

Modellierung der optischen Eigenschaften gestrichener Papiere unter besonderer Berücksichtigung der Porenstruktur

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Martin Hucke

aus Heide

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Samuel Schabel
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Manfred J. Hampe
Tag der Einreichung:	25. Februar 2005
Tag der mündlichen Prüfung:	31. Mai 2005

Darmstadt 2005

D 17

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Erklärung.....	IV
Vorwort	V
Liste der verwendeten Buchstaben und Abkürzungen.....	VI
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Theorie der Streuung.....	3
2.1 Allgemeine Bemerkungen.....	3
2.2 Rayleigh-Streuung	3
2.3 Mie-Streuung	5
2.4 Optische Streuung	8
3 Modellierung von Papier – Stand des Wissens.....	10
3.1 Modelle verschiedener papiertechnologischer Verfahren.....	10
3.2 Modellierung optischer Eigenschaften.....	11
3.2.1 Lichtstreuung in Papier - Begriff des „trüben Mediums“	11
3.2.2 Blattstoßtheorie	12
3.2.3 Kubelka-Munk-Theorie	16
3.2.3.1 Voraussetzungen zur Anwendbarkeit der Kubelka-Munk-Theorie	16
3.2.3.2 Definition des Lambertstrahlers.....	16
3.2.3.3 Herleitung der Kubelka-Munk-Gleichungen	18
3.2.3.4 Berechnung der Kubelka-Munk-Kenngrößen S und K	20
3.2.3.5 Glanz	22
3.2.4 Weitere Modelle zur Beschreibung der optischen Eigenschaften	26
3.3 Bestimmung optischer Eigenschaften.....	29
3.3.1 Theoretische Grundlagen	29
3.3.2 Optische Eigenschaften von einschichtsystemen	30
3.3.3 Optische Eigenschaften von Mehrschichtsystemen.....	31

3.3.3.1	Modellierung der optischen Eigenschaften von Mehrschichtsystemen.....	31
3.3.3.2	Berechnung der optischen Eigenschaften von Mehrschichtsystemen	32
4	Porengrößenanalyse mittels Quecksilber-Porosimetrie	35
4.1	Methode zur Bestimmung der Porenstruktur und Einfluss der Porenstruktur auf Papiereigenschaften	35
4.2	Theoretische Grundlagen des Messverfahrens	36
4.3	Durchführung der Messung	37
4.4	Ergebnisdarstellung der Porengrößenanalyse	38
5	Optische Eigenschaften von Streichfarben	41
5.1	Ziel des Streichens	41
5.2	Untersuchtes Probenmaterial	41
5.3	Herstellung der gestrichenen Proben	43
5.3.1	Strichauftrag.....	43
5.3.2	Ermittlung des Strichgewichts	43
5.4	Partikelgrößenverteilung der Pigmente.....	44
5.5	Messung der optischen Eigenschaften	47
5.6	Reflexionskurven der untersuchten Streichfarben	48
5.7	Farborte der untersuchten Streichfarben	49
5.8	Abdeckleistung von Streichfarben.....	50
5.8.1	Definition der Abdeckleistung.....	50
5.8.2	Modell der Abdeckleistung von Paetow und Ohrnberger.....	51
5.8.2.1	Herleitung des linearisierten Gleichungssystems	51
5.8.2.2	Spezifische Abdeckleistung	53
5.8.3	Porosimetrische Betrachtung der Strichschichten.....	54
5.9	Berechnung des Lichtstreuoeffizienten.....	60
6	Modellierung gestrichener Papiere	65
6.1	Allgemeine Bemerkungen.....	65

6.2	Rechnerische Überprüfung des Schichtenmodells nach Kubelka-Munk.....	68
6.3	Fehlerbetrachtung der Kubelka-Munk-Koeffizienten.....	70
6.4	Einseitig gestrichene Papiere	73
6.4.1	Allgemeine Bemerkungen.....	73
6.4.2	Modellierung der Mischschicht	74
6.4.2.1	Zusammensetzung und Aufbau der Mischschicht	74
6.4.2.2	Fallballspiele zum Aufbau der Mischschicht.....	77
6.4.3	Einschichtmodell mit vollständig durchtränktem Rohpapier.....	77
6.4.4	Zweischichtmodell mit isolierter Strichschicht.....	80
6.4.5	Zweischichtmodell mit Mischschicht	81
6.4.6	Modifiziertes Zweischichtsystem mit Mischschicht.....	83
6.4.7	Zweischichtmodell mit fixer Penetrationsschicht.....	87
6.4.8	Dreischichtmodell mit isolierter Strichschicht und Mischschicht	90
6.4.9	Modifiziertes Dreischichtmodell.....	93
6.4.10	Zusammenfassung einseitig gestrichene Papiere.....	95
6.5	Beidseitig gestrichene Papiere	102
6.5.1	Allgemeine Bemerkungen.....	102
6.5.2	Zweischichtmodell mit isolierten Strichschichten	104
6.5.3	Modifiziertes Zweischichtsystem mit Mischschichten	105
6.5.4	Modifiziertes Dreischichtsystem.....	107
6.5.5	Zusammenfassung beidseitig gestrichene Papiere.....	108
7	Zusammenhang zwischen Lichtstreuoeffizient und Porenoberfläche	112
8	Zusammenfassung.....	118
9	Literaturverzeichnis	122
Anhang A	Herleitung der Kubelka-Munk-Gleichungen	131
Anhang B	Optische Zustandsebene.....	141
Anhang C	Tabellen.....	145

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine fremden Hilfsmittel außer den genannten verwendet habe. Ich habe bisher noch keinen Promotionsversuch unternommen.

A handwritten signature in black ink, reading "Martin Heide". The script is cursive and fluid, with the first name "Martin" and the last name "Heide" clearly distinguishable.

Darmstadt, im Januar 2005

Vorwort

Für die wohlwollende Förderung und Unterstützung dieser Arbeit möchte ich dem Leiter des Fachgebiets Papierfabrikation an der Technischen Universität Darmstadt, Herrn Prof. Dr.-Ing. S. Schabel, sowie seinem Vorgänger, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. L. Göttching, sehr herzlich danken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Hampe danke ich für die bereitwillige Übernahme des Korreferats.

Mein besonderer Dank gilt jenen Mitarbeitern des Fachgebiets Papierfabrikation, die mich mit ihren zahlreichen Hinweisen und Ratschlägen inspiriert und damit zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben

Gedankt sei auch den Mitarbeitern der Technologie-Abteilung der Norske Skog Walsum GmbH für ihre Diskussionsbereitschaft sowie die großzügige Bereitstellung von Probematerial.

A handwritten signature in black ink, reading "Martin Hampe". The script is cursive and fluid, with the first name "Martin" and the last name "Hampe" clearly distinguishable.

Darmstadt, im Januar 2005

Liste der verwendeten Buchstaben und Abkürzungen***Lateinische Buchstaben:***

a	Beschleunigung
a^*	Wert auf der Rot-Grün-Achse im CIELAB-Farbsystem
b^*	Wert auf der Gelb-Blau-Achse im CIELAB-Farbsystem
d	Durchmesser
i	Intensität des nach unten gerichteten Lichtstroms
j	Intensität des nach oben gerichteten Lichtstroms
k	Absorptionskoeffizient
k_{Ext}	Extinktionskoeffizient
m_A	flächenbezogene Masse
$m_A(\text{RP})$	flächenbezogene Masse des Rohpapiers
$m_A(\text{Strich})$	flächenbezogene Masse des Strichs
$m_A^{(i)}$	flächenbezogene Masse der i-ten Schicht
$m_A'(\text{RP})$	flächenbezogene Masse der Rohpapierschicht, die von Streichfarbe benetzt wird
$m_A'(\text{Strich})$	flächenbezogene Masse der ins Rohpapier eindringenden Streichfarbe
n	Brechungsindex
n_0	Brechungsindex der Umgebung
n'	komplexer Brechungsindex
p	Druck
p_0	Umgebungsdruck
q	Anzahl
r	Radius
s	Streukoeffizient
t	Zeit
u	Schwingungsamplitude
u_0	maximale Schwingungsamplitude
x	Wegkoordinate
\bar{y}	Normspektralwert

A	Fläche
A_{spez}	massenbezogene/spezifische Fläche
I	Strahlungsintensität
I_{streu}	Strahlungsintensität des gestreuten Lichts
K	dichtebezogener Lichtabsorptionskoeffizient
K_{Ext}	Extinktionskonstante
K_{ges}	dichtebezogener Lichtabsorptionskoeffizient des Gesamtsystems
K_{Misch}	dichtebezogener Lichtabsorptionskoeffizient der Mischschicht
K_{RP}	dichtebezogener Lichtabsorptionskoeffizient des Rohpapiers
K_{Strich}	dichtebezogener Lichtabsorptionskoeffizient der Streichfarbe
L	Leuchtdichte
L^*	Wert auf der Hell-Dunkel-Achse im CIELAB-Farbsystem
O	Opazität
P	Lichtleistung
P_0	Lichtleistung des eingestrahlten Lichts
Q_{Streu}	Wirkungsfaktor nach Mie
R	Reflexionsfaktor
R_0	Reflexionsfaktor eines Einzelblatts über schwarzem Untergrund
R_{ges}	Gesamtreflexionsfaktor
R_i	Reflexionsfaktor von i Blättern über schwarzem Untergrund
R_{Korr}	Korrelationskoeffizient
R_u	Reflexionsfaktor der Probe über der Unterlage
R_{∞}	Eigenreflexionsfaktor
$R(u)$	Reflexionsfaktor der Unterlage
S	dichtebezogener Lichtstreuungskoeffizient
S_{ges}	dichtebezogener Lichtstreuungskoeffizient des Gesamtsystems
S_{Misch}	dichtebezogener Lichtstreuungskoeffizient der Mischschicht
S_{RP}	dichtebezogener Lichtstreuungskoeffizient des Rohpapiers
S_{Strich}	dichtebezogener Lichtstreuungskoeffizient der Streichfarbe
T	Transmission
T_i	Transmission von i Papierblättern
Y	Helligkeit

Griechische Buchstaben:

α	Gewichtungsfaktor des dichtebezogenen Lichtstreuungskoeffizienten des Rohpapiers
β	Gewichtungsfaktor des dichtebezogenen Lichtstreuungskoeffizienten der Streichfarbe
γ	Gewichtungsfaktor des dichtebezogenen Lichtabsorptionskoeffizienten des Rohpapiers
δ	Gewichtungsfaktor des dichtebezogenen Lichtabsorptionskoeffizienten der Streichfarbe
θ	Kontaktwinkel
φ	Winkel
λ	Wellenlänge
μ	Massenanteil
ρ	Radius
σ	Oberflächenspannung
ω	Kreisfrequenz

Abkürzungen:

DIN	Deutsches Institut für Normung
DIP	de-inked pulp (Deinkingstoff)
Labor C1	Laborstreichfarbe auf Basis des Pigments C1 (Calciumcarbonat)
Labor C2	Laborstreichfarbe auf Basis des Pigments C2 (Calciumcarbonat)
Labor C3	Laborstreichfarbe auf Basis des Pigments C3 (Calciumcarbonat)
Labor K1	Laborstreichfarbe auf Basis des Pigments K1 (Kaolin)
Labor K2	Laborstreichfarbe auf Basis des Pigments K2 (Kaolin)
Labor K3	Laborstreichfarbe auf Basis des Pigments K3 (Kaolin)
LWC	light-weight coated (leichtgewichtig gestrichen)
Praxis C	Praxisstreichfarbe auf Basis eines Calciumcarbonats
Praxis K1	Praxisstreichfarbe auf Basis eines Kaolins
Praxis K2	Praxisstreichfarbe auf Basis eines Kaolins
SC	supercalendered (satiniert)
UV	Ultraviolett
ZDP	Zeitungsdruckpapier

1 Einleitung und Zielsetzung

Grafische Papiere stellen nach den Verpackungspapieren weltweit den zweitgrößten Mengenanteil der Papierproduktion dar, in Deutschland liegt der Anteil der grafischen Papiere sogar höher. Von den Telefonbuch- und Zeitungsdruckpapieren über Magazinpapiere, Kopier- und Inkjetpapiere bis hin zu hochwertigen Kunstdruckpapieren umfasst das Segment der grafischen Papiere das ganze Spektrum solcher Erzeugnisse, die beschrieben oder bedruckt werden. Die wichtigsten Qualitätskriterien der grafischen Papiere sind daher die optischen Eigenschaften sowie die Bedruckbarkeit. Je nach Papiersorte liegt dabei der Schwerpunkt auf verschiedenen Eigenschaften. So erfordert beispielsweise ein Zeitungsdruckpapier primär eine hohe Opazität, während das Papier eines Katalogs von Hochpreisleistungsprodukten in der Regel einen hohen Glanz aufweisen soll.

So unterschiedlich wie der Einsatzzweck der Papiere ist auch deren Zusammensetzung. Angefangen mit einfachen Zeitungsdruckpapieren, die in Deutschland ausschließlich aus aufbereitetem Altpapier hergestellt werden, bis hin zu mehrfach gestrichenen grafischen Kartons umfasst die Palette der Rohstoffe alle Faserstoffe in beliebiger Kombination. Im Fall gestrichener Papiere variiert ferner die Auftragsmasse des Strichs beträchtlich. Um die optischen Eigenschaften einer solchen Produktvielfalt gleichermaßen bewerten zu können, bedarf es eines Regelwerks mit allgemeiner Gültigkeit. Entsprechende Prüfvorschriften sind in verschiedenen nationalen und internationalen Normen festgelegt. Basis dieser Normen ist in der Regel die Theorie von Kubelka und Munk [1], welche die optischen Eigenschaften auf einige wenige, relativ leicht zu bestimmende Parameter zurückführt.

Um Aussagen über die zu erwartenden Eigenschaften von Papier treffen zu können, ist eine Modellierung erforderlich. Für grafische Papiere ist dabei in erster Linie ein Modell von Interesse, welches die optischen Eigenschaften des Papiers aus den Eigenschaften der einzelnen Bestandteile ableitet. Hierzu ist die Kenntnis der Wechselwirkungen des Lichts mit den verschiedenen Komponenten innerhalb des Papiers notwendig. Auf diesem Ansatz beruht die Theorie von Kubelka und Munk, deren Modell trotz gewisser einschränkender Randbedingungen auf die meisten Papiere angewendet werden kann. Tiefere Einblicke in die optischen Eigenschaften von Strichen gewährt ferner die Theorie von Mie [2].

Innerhalb des Segments der grafischen Papiere gewinnen die gestrichenen Papiere zunehmend an Bedeutung. Die Modellierung gestrichener Papiere steht aber vor dem Problem, dass sich aufgrund des Veredelungsschritts des Streichens ein System unterschiedlicher Schichten ausbildet, die sich der direkten Beobachtung weitgehend entziehen. Insbesondere an der Grenzfläche zwischen Papier und Streichfarbe entsteht eine Schicht, deren wesentliche Eigenschaften wie Dicke oder Zusammensetzung unbekannt sind, da hier neben den rheologischen Eigenschaften der Streichfarbe auch die speziellen Bedingungen während des Streichprozesses eine wichtige Rolle spielen. Soll nun aber das Papier modelliert werden, sind gerade diese Merkmale für die Beschreibung der optischen Eigenschaften vonnöten. Es war daher das Ziel der vorliegenden Arbeit, aufgrund phänomenologischer Betrachtungen eine Methode zu finden, das sich ausbildende Schichtsystem modellhaft zu beschreiben. Gestützt auf die Theorie von Kubelka und Munk wurde der Versuch unternommen, die unterschiedlichen Einflüsse der verschiedenen Schichten auf die optischen Eigenschaften des Gesamtsystems mittels Gewichtungsfaktoren zu quantifizieren und so das System berechenbar zu machen.

Ein wichtiges Hilfsmittel bei der Modellierung ist die Betrachtung der Porenstruktur. Die optischen Eigenschaften eines Objekts definieren sich in erster Linie über dessen Streu- und Absorptionsvermögen. Das Streuvermögen wiederum wird durch Streuprozesse bestimmt, die an Phasengrenzen mit unterschiedlichen Brechungsindizes auftreten. Im Fall von Papier sind das die Kontaktflächen der luftgefüllten Hohlräume mit den Fasern und Füllstoffen, da sich an diesen Stellen der Brechungsindex sprunghaft ändert. Untersucht man also die Porenstruktur des Papiers, erhält man Hinweise auf die resultierenden optischen Eigenschaften. Dabei darf aber nur ein gewisser Teil des Porenspektrums betrachtet werden, denn je nach Größe der Poren wird das Licht im sichtbaren Wellenlängenbereich unterschiedlich stark gestreut. Die Porengrößenverteilung kann auf diese Weise dazu beitragen, die Annahmen über die verschiedenen Schichten zu konkretisieren.

2 Theorie der Streuung

2.1 Allgemeine Bemerkungen

Trifft eine elektromagnetische Welle auf einen makroskopischen Körper, wird ein Teil der Strahlungsenergie an der Oberfläche reflektiert. Je nach Beschaffenheit der Oberfläche lassen sich die Grenzfälle der regulären Reflexion bei ideal glatter Oberfläche sowie die diffuse Reflexion bei ideal matter Oberfläche unterscheiden. Zwischen beiden Grenzfällen gibt es in der Praxis alle möglichen Übergänge [3].

Eine mathematische Beschreibung der Reflexionsphänomene erhält man, wenn diese auf mikroskopische Streu- und Absorptionsvorgänge zurückgeführt werden. Hier erweist sich die Mie-Theorie als geeignetes Hilfsmittel, um die Rückstrahlcharakteristik in einen Zusammenhang zur eingestrahlten Energie zu bringen [2]. Dabei wird ein kugelförmiger Reflektor betrachtet, dessen winkelabhängige Abstrahlung als Funktion verschiedener Variablen berechnet werden kann. Hierzu zählen neben der Größe des Reflektors die Wellenlänge des eingestrahlten Lichts sowie die Brechzahlen des Reflektors und des ihn umgebenden Mediums. Mit der Mie-Theorie lassen sich die Streuphänomene von Teilchen aller Größen beschreiben. Im Grenzfall sehr kleiner Teilchen geht die Mie-Streuung in die mathematisch einfachere Rayleigh-Streuung über, bei sehr großen Teilchen wird das Gebiet der optischen Streuung erreicht. Die Übergänge sind dabei fließend. Im Folgenden werden die verschiedenen Bereiche der Streuung näher beleuchtet.

2.2 Rayleigh-Streuung

Fällt Licht auf ein streuendes Medium, wird ein Teil des eingestrahlten Lichts in verschiedenen Richtungen gestreut. Dabei wirken die an den Kern gebundenen Elektronen als elementare Streuzentren, deren Durchmesser sehr klein gegen die Wellenlänge des eingestrahlten Lichts ist. Die Elektronen können als harmonische Oszillatoren angesehen werden, die durch das elektromagnetische Feld des einfallenden Lichts zu erzwungenen Schwingungen angeregt werden. Die Abstrahlung erfolgt anschließend entsprechend der Charakteristik einer Dipolantenne bzw. eines Hertzschen Dipols [4]. Dieser Dipol sendet seinerseits sekundäre elektromagnetische Wellen gleicher Frequenz in alle Richtungen aus, d. h. die Primärwellen werden gestreut. Liegt die Frequenz des anregenden Lichts deutlich niedriger als die Eigenfrequenz des Oszillators, kann dieser der Anregung nahezu träg-

heitslos folgen. Das bedeutet, dass die Auslenkungsamplitude frequenzunabhängig wird und lediglich der Feldstärke der anregenden Welle proportional ist.

Abb. 2-1 zeigt die Strahlungscharakteristik eines Hertzschen Dipols. Die unter dem Winkel φ abgestrahlte Intensität I des mit a beschleunigten Oszillators folgt dabei der Beziehung [4]:

$$I(\varphi) \sim a^2 \cdot \sin^2 \varphi \quad (2-1).$$

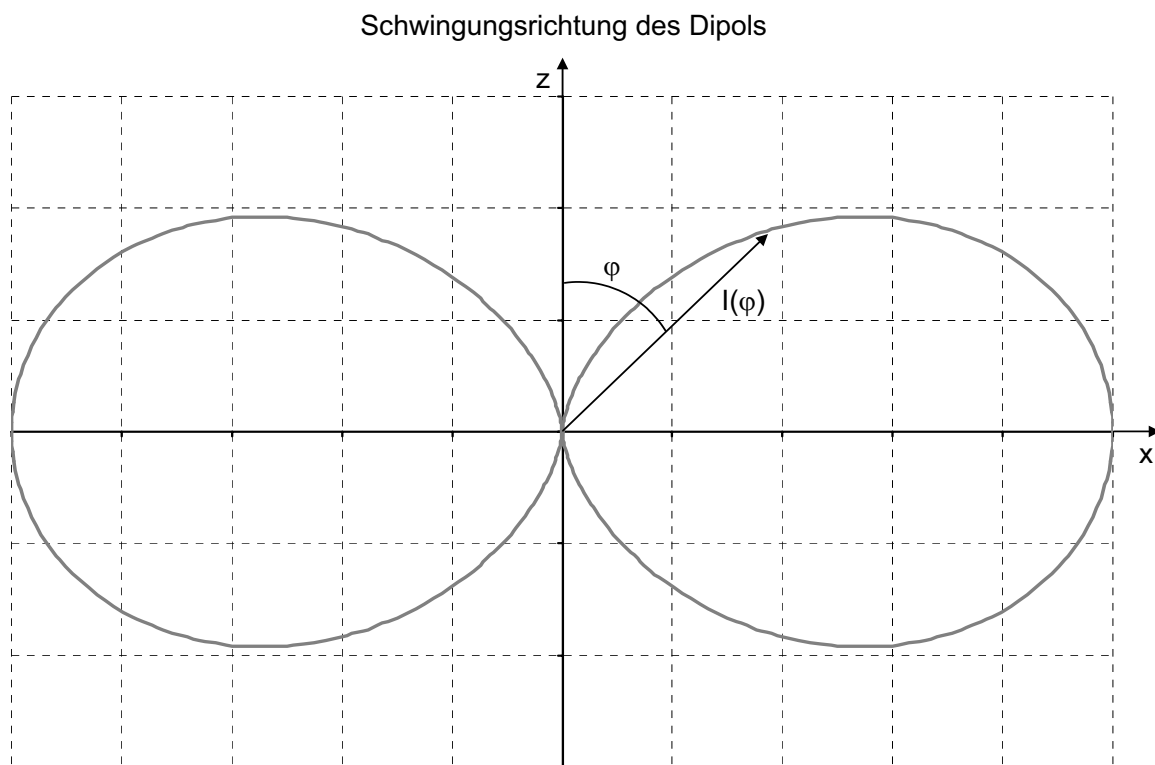


Abb. 2-1: Strahlungscharakteristik eines Hertzschen Dipols

In Richtung seiner Achse strahlt der Dipol also nicht aus, während das Maximum der Intensität senkrecht zur Schwingungsrichtung erzielt wird. Die Abstrahlfunktion ist rotationssymmetrisch zur Dipolachse und beschreibt somit einen Torus.

Wird als Weg-Zeit-Funktion des Oszillators die Funktion

$$u = u_0 \sin \omega t \quad (2-2)$$

mit u : Schwingungsamplitude zum Zeitpunkt t
 u_0 : maximale Schwingungsamplitude
 ω : Kreisfrequenz

zugrunde gelegt, ergibt sich für die Beschleunigung a :

$$a = \ddot{u} = -u_0 \omega^2 \sin \omega t \quad (2-3).$$

(2-3) eingesetzt in (2-1) ergibt den folgenden Zusammenhang für die abgestrahlte Intensität [5]:

$$I_{\text{streu}} \sim x_0^2 \omega^4 \cdot \sin^2 \omega t = x_0^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \sin^2 \omega t \quad (2-4).$$

Das Streuvermögen ändert sich also reziprok mit der vierten Potenz der Wellenlänge λ . Wie eingangs erwähnt gilt dieser Zusammenhang für den Fall, dass die streuenden Teilchen sehr klein gegenüber der Wellenlänge des eingestrahnten Lichts sind. Diese Streuung wird als Rayleigh-Streuung bezeichnet und geht auf die Theorie der Lichtstreuung an Gasen zurück, die von Rayleigh gegen Ende des 19. Jahrhunderts entwickelt wurde [6]. Ein Beispiel für Rayleigh-Streuung ist das Blau des Himmels. Die Dichtefluktuationen der Luft, deren geometrische Abmessungen von geringerer Größe als die Wellenlänge des sichtbaren Lichts sind, haben eine stärkere Streuung des kurzwelligen blauen Lichts im Vergleich zum langwelligen roten Licht zur Folge, weshalb uns der Himmel blau erscheint.

2.3 Mie-Streuung

Sind die streuenden Teilchen von vergleichbarer Abmessung wie die Wellenlänge der auftreffenden Strahlung, treten Interferenzeffekte auf, die zu winkelabhängigen Verstärkungen bzw. Abschwächungen der interferierenden Wellenfronten führen. Zur Beschreibung dieser Effekte stellte Mie ein System von Differenzialgleichungen auf, dessen Lösungen diese Phänomene physikalisch korrekt beschreiben konnten [2]. Die von Mie gefundenen Zusammenhänge gelten für Teilchen beliebiger Größe. Im Grenzfall sehr kleiner Teilchen, wenn der Teilchendurchmesser d sehr klein gegenüber der Lichtwellenlänge λ ist, geht die Mie-Streuung in die Rayleigh-Streuung über. Bei sehr großen Teilchen ($d \gg \lambda$) gelangt

man in den Bereich der optischen Streuung. In diesen beiden Grenzfällen gehen die allgemein gültigen Gleichungen der Mie-Streuung in sehr viel einfachere Berechnungsvorschriften über.

Eine Konsequenz aus der Mie-Theorie besteht in einer veränderlichen streuenden Querschnittsfläche des Reflektors, die sich vom tatsächlichen Querschnitt unterscheidet [7]. Die Verknüpfung zwischen geometrischer und wirksamer streuender Querschnittsfläche berechnet sich nach Mie für kugelförmige Reflektoren gemäß folgender Beziehung [3/8]:

$$Q_{\text{Streu}} = \frac{8}{3} x^4 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \quad (2-5)$$

mit $x = \frac{2\pi r}{\lambda}$ und $m = \frac{n}{n_0}$

Q_{Streu} : Wirkungsfaktor,

r : Radius des streuenden Teilchens,

λ : Wellenlänge des Lichts,

n : Brechzahl des streuenden Teilchens,

n_0 : Brechzahl des Umgebungsmediums.

Die Berechnung des Betrags in (2-5) folgt aus dem Umstand, dass die Brechzahl in der allgemeinen Form eine komplexe Größe ist, der Wirkungsfaktor jedoch eine reelle Zahl. Der Wirkungsfaktor gibt demnach an, um wie viel die durch Streuung an einem kugelförmigen Reflektor verursachte Schwächung eines parallelen Strahlenbündels größer oder kleiner ist als die reine Abschattung, die sich durch die Querschnittsfläche der Kugel ergibt.

Die Änderung des Wirkungsfaktors in Abhängigkeit von r , λ und n wird anhand der nachfolgenden Abbildungen verdeutlicht, welche die Resultate der nach Schmitt [9] durchgeführten Berechnungen sind. Zur Vereinfachung wurde in allen Fällen Luft als Umgebungsmedium angenommen, sodass überall $n_0 = 1$ gilt.

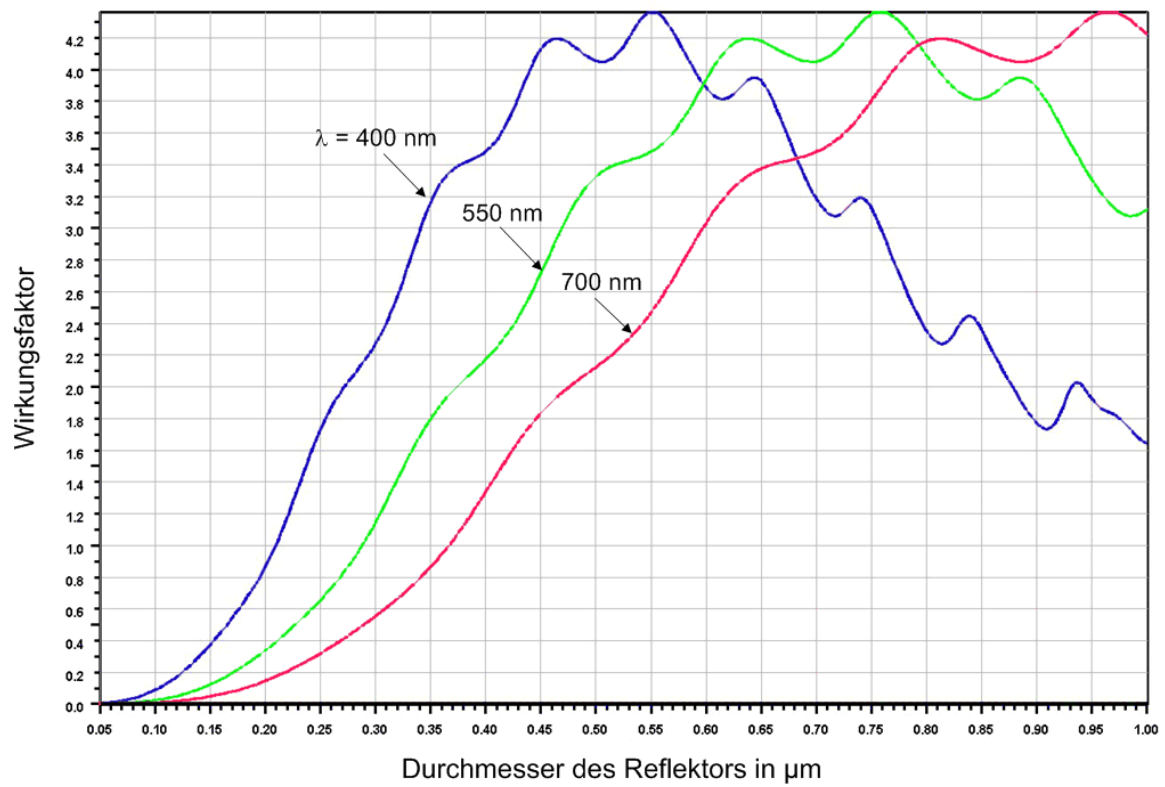


Abb. 2-2: Abhängigkeit des Wirkungs-faktors Q_{Streu} von der Größe des kugelförmigen Reflektors bei verschiedenen Lichtwellenlängen für $n = 1,5$

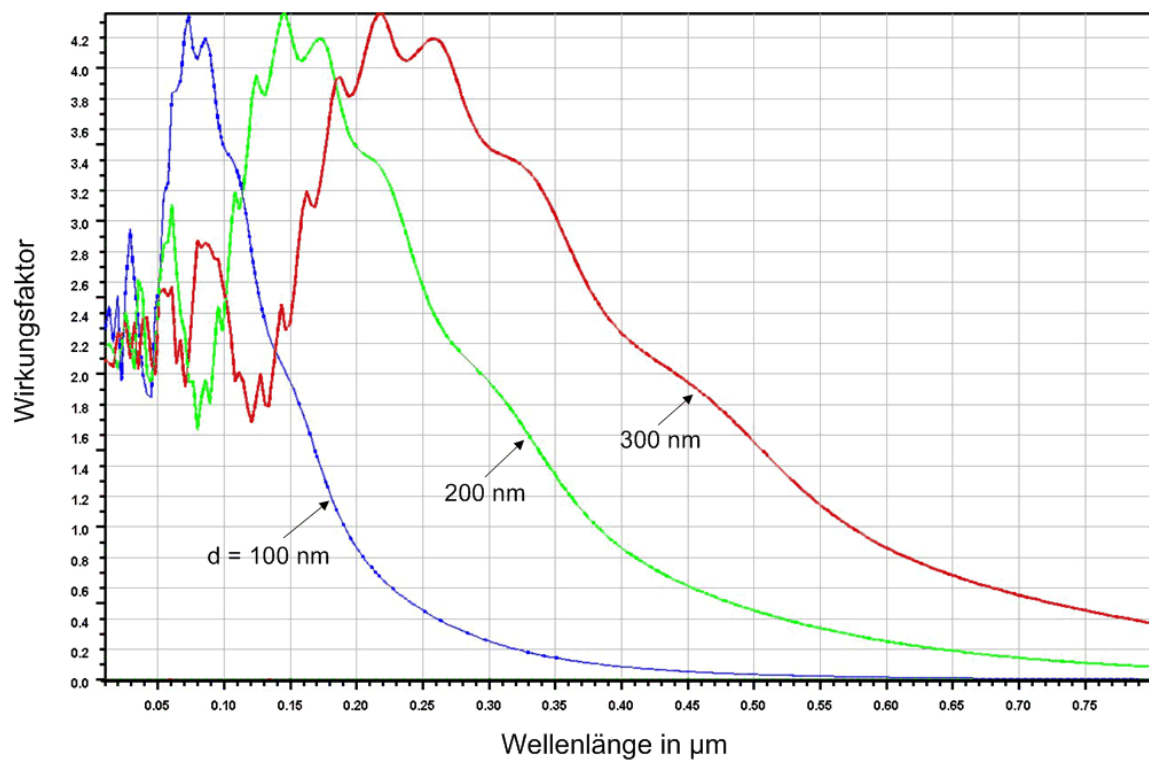


Abb. 2-3: Abhängigkeit des Wirkungs-faktors Q_{Streu} von der Lichtwellenlänge bei verschiedenen Reflektorgrößen für $n = 1,5$

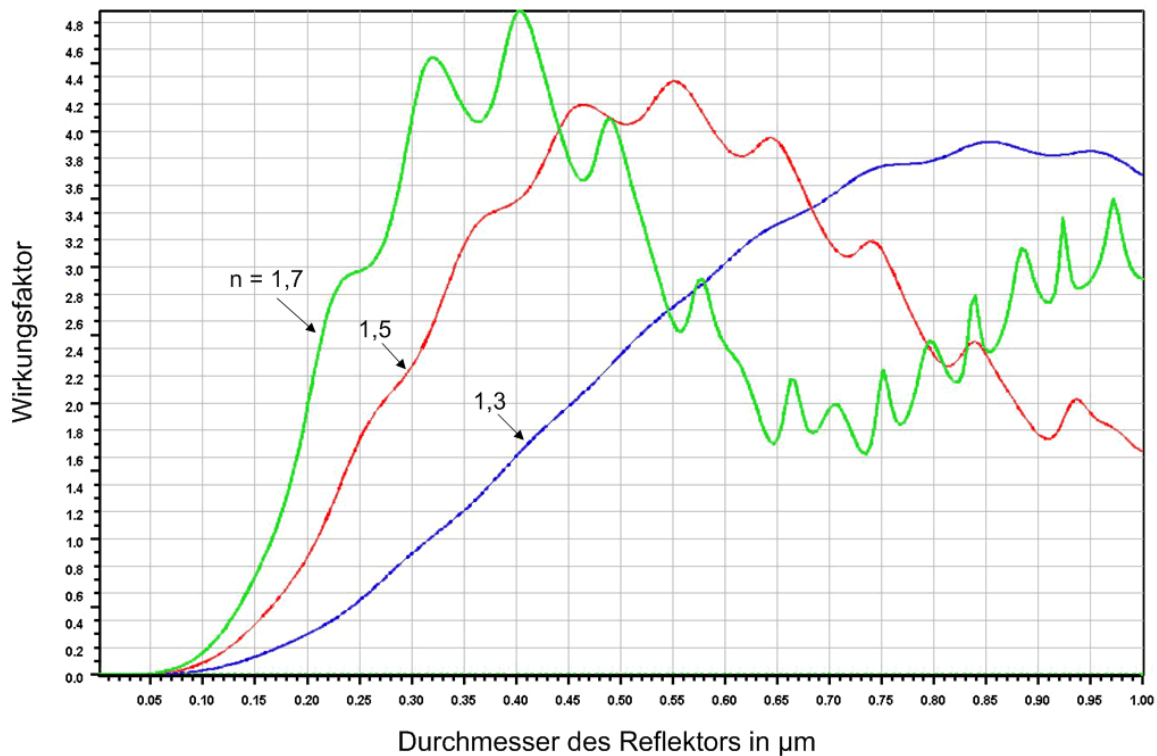


Abb. 2-4: Abhängigkeit des Wirkungsfaktors Q_{Streu} von der Größe des Reflektors bei verschiedenen Reflektorbrechzahlen für $\lambda = 400 \text{ nm}$

Man erkennt die starken Schwankungen, die der Wirkungsfaktor bereits bei kleinen Variationen der Variablen zeigt. Im Extremfall großer Brechzahlen kann der Wirkungsfaktor Werte von $Q_{Streu} > 10$ annehmen, wobei die Kurven einen sehr großen Gradienten aufweisen.

Die starke Frequenzabhängigkeit der Lichtstreuung hat eine große Bedeutung in der atmosphärischen Optik, da die Wassertröpfchen in der Atmosphäre eine der Wellenlänge des sichtbaren Lichts vergleichbare Größe haben. Ähnliche Abmessungen zeigen auch die Poren in den Strichschichten gestrichener Papiere. Dies gilt es bei der Interpretation von Messergebnissen zu berücksichtigen, da insbesondere bei sehr dünnen Strichschichten die Mie-Streuung einen nicht zu vernachlässigenden Anteil aufweisen kann.

2.4 Optische Streuung

Sind die Abmessungen der Teilchen größer als die Lichtwellenlänge, lässt sich die Wechselwirkung einer ebenen elektromagnetischen Welle mit einem Teilchen durch die Begriffe Reflexion, Brechung und Beugung beschreiben. In diesem Fall spricht man von optischer

Streuung, und die bekannten Gesetze der Strahlenoptik bzw. geometrischen Optik können zur Anwendung kommen [4]. Die Streucharakteristik ist in diesem Bereich weitestgehend frequenzunabhängig. Nahezu alle Bestandteile von Papier (Fasern, Fein- und Füllstoffe) sind ausreichend groß, um die eingangs erwähnte Bedingung zu erfüllen, sodass in der Regel die Gültigkeit der Gesetze der Strahlenoptik mit hinreichender Genauigkeit zugrunde gelegt werden kann.

3 Modellierung von Papier – Stand des Wissens

3.1 Modelle verschiedener papiertechnologischer Verfahren

Papier besteht zum überwiegenden Teil aus Fasern, die in der Regel aus Holz gewonnen werden. Die natürliche Herkunft hat zur Folge, dass die Fasern keine einheitlichen morphologischen und mechanischen Eigenschaften zeigen, sondern eine gewisse Streubreite dieser Größen sichtbar wird. Im Verlauf des Aufbereitungsprozesses erfahren die Fasern infolge mechanischer Arbeit und chemischer Prozesse weitere Änderungen, sodass am Ende ein Gemisch aus Fasermaterial unterschiedlichster Größe und Form vorliegt.

Um die Verfahrensabläufe im Verlauf der Papierherstellung möglichst genau steuern zu können, ist eine detaillierte Kenntnis des Verhaltens der Fasern erforderlich. Im Gegensatz zu homogenen Werkstoffen anorganischer Natur, wie beispielsweise Metallen, ist es aber für ein heterogenes Gemisch natürlicher Komponenten ungleich schwieriger, mathematische Modelle aufzustellen, welche die Herstellungsprozesse oder die Eigenschaften von Papier hinreichend genau beschreiben können. Mittlerweile ist es aber gelungen, praktisch den gesamten Produktionsprozess von Papier zumindest in Ansätzen mit Hilfe geeigneter Modelle zu beschreiben und mittels numerischer Verfahren zu berechnen.

Sowohl die Zellstofferzeugung [10/11/12/13] und Zellstoffbleiche [14/15/16] aber auch insbesondere die Mahlung [17/18/19/20/21/22] sind bereits in unterschiedlichster Form modelliert worden. Ebenso existieren schon Ansätze zur Modellierung der Sortierung [23/24/25] sowie der komplexen Vorgänge während des Deinkings [26/27/28]. Eine besondere Herausforderung stellen auf Grund der hohen Dynamik die Vorgänge an der Papiermaschine dar. Aber auch in diesem Bereich sind bereits verschiedene Arbeiten veröffentlicht worden, welche die Prozesse modellhaft beschreiben. Angefangen mit den Vorgängen während der Formierung [29/30] über die Beschreibung der Wechselwirkung der Fasern untereinander [31/32] bzw. mit Füllstoffen [33] oder Hilfsmitteln [34] bis zu den Vorgängen in der Pressenpartie [35/36/37/38] sowie der Trockenpartie [39/40/41/42] sind die verschiedenen Verfahrensabläufe innerhalb der Papiermaschine parametrisiert und modelliert worden. Sogar eine komplette Papiermaschine wurde modelliert, um die Prozesssteuerung im Hinblick auf bestimmte Papiermerkmale zu optimieren [43].

Auch die Weiterverarbeitungsschritte Streichen [44/45/46/47/48] und Kalandrieren [49] waren schon Themen verschiedener Modellierungen, ebenso wie die Vorgänge während des Druckens [50/51].

Ein Schwerpunkt weiterer Veröffentlichungen lag auf der Modellierung von Papiereigenschaften. Inhalte dieser Arbeiten sind z. B. die Modellierung des Fasernetzwerks [52/53/54/55] oder auch der Festigkeitseigenschaften [56/57/58] und von Struktureigenschaften [59/60/61/62/63].

Schließlich sind auch die optischen Eigenschaften auf der Basis unterschiedlicher Ansätze modelliert worden. Diese Modelle werden im folgenden Kapitel näher beleuchtet.

3.2 Modellierung optischer Eigenschaften

3.2.1 Lichtstreuung in Papier - Begriff des „trüben Mediums“

Im optischen Sinn lassen sich grundsätzlich klare und trübe Medien unterscheiden. In optisch klaren Medien findet die Lichtausbreitung geradlinig statt. Eine Schwächung der Lichtintensität durch Absorption ist möglich, eine Streuung hingegen nicht. Im Gegensatz dazu zeichnen sich optisch trübe Medien durch eine Kombination von Absorption und Streuung aus. Ursache für die Streuvorgänge sind dabei unterschiedliche Brechzahlen der Einzelkomponenten des Mediums. An den Grenzflächen zweier Komponenten mit verschiedenen Brechzahlen treten Streu- und Absorptionsvorgänge auf, die mittels der Fresnelschen Gleichungen beschrieben werden können [3/4/8].

Papier hat eine komplexe Struktur und kann als ein dreidimensionales Netzwerk aus cellulosem Fasermaterial, mineralischen Füllstoffpigmenten und Luft aufgefasst werden. Fällt Licht auf ein Papier, finden auf der Oberfläche und im Inneren des Papiers viele Reflexions-, Streu- und Absorptionsprozesse statt, die jedoch nicht isoliert voneinander wahrgenommen werden können. Ein Beobachter erkennt lediglich die Überlagerung all dieser Prozesse und sieht eine weiße, zumeist matte Oberfläche. Als Messwert kann nur die Intensität des remittierten Lichts erfasst werden, aus dem sich bei bekannter eingestrahelter Lichtintensität der Remissions- bzw. Reflexionsgrad des Papiers bestimmen lässt [64].

Aufgrund der Streuphänomene an den Grenzflächen der verschiedenen Bestandteile, die eine Folge der unterschiedlichen Brechzahlen sind, kann Papier im optischen Sinn als trü-

bes Medium aufgefasst werden. Im Gegensatz zu optisch klaren Medien müssen daher bei Papier und allen anderen trüben Medien nicht nur die Absorptionseigenschaften, sondern auch die Streueigenschaften über Materialkenngrößen quantifiziert werden. Diese Kenngrößen werden als Absorptionskoeffizient k sowie Streukoeffizient s bezeichnet. Da diese Koeffizienten längenbezogene Größen darstellen, haben sie die Dimension m^{-1} . Voraussetzung für die Charakterisierung mittels jeweils nur eines dieser Koeffizienten ist jedoch, dass Streu- und Absorptionsvermögen des trüben Mediums konstant und isotrop sind. In diesem Fall bilden die Kenngrößen s und k ein mittelndes Maß und machen den an sich inhomogenen Körper zu einem im Mittel homogenen. Im Idealfall sind s und k dann auch von der Dicke des Papiers unabhängig.

3.2.2 Blattstoßtheorie

Im Segment der grafischen Papiere spielen die optischen Eigenschaften eine entscheidende Rolle. Daher wurde von verschiedenen Autoren schon seit vergleichsweise langer Zeit versucht, die optischen Eigenschaften von Papier zu modellieren und auf diese Weise berechenbar zu machen. Bereits Mitte des 19. Jahrhunderts versuchte Stokes, die Remissions- und Transmissionsverhältnisse an einem Stapel planparalleler Schichten zu beschreiben, um die Gesamtremission zu ermitteln [65]. Dieser Ansatz bildete auch die Grundlage späterer Arbeiten mit dem gleichen Ziel. Anhand der von Schmidt entwickelten Blattstoßtheorie [66/67] soll diese Vorgehensweise hier kurz erläutert werden.

Grundlage der Blattstoßtheorie ist die Untersuchung der Änderung der optischen Verhältnisse an einem Stoß gleicher Blätter mit variabler Blattzahl. Fällt ein Lichtstrom auf ein einzelnes Blatt Papier, wird er in drei Teilströme geteilt, nämlich den remittierten (R), den transmittierten (T , „Transparenz“) sowie den absorbierten Teilstrom. Der absorbierte Teilstrom liefert keinen Anteil sichtbaren Lichts und braucht daher nicht weiter berücksichtigt zu werden. Liegt das Papierblatt auf einer Unterlage mit dem Reflexionsfaktor $R(u)$, so trägt auch der durch das Papier hindurch getretene und an der Unterlage reflektierte Lichtstrom mit zur Gesamtremission bei. **Abb. 3-1** demonstriert die Modellvorstellung, die der Blattstoßtheorie zugrunde liegt.

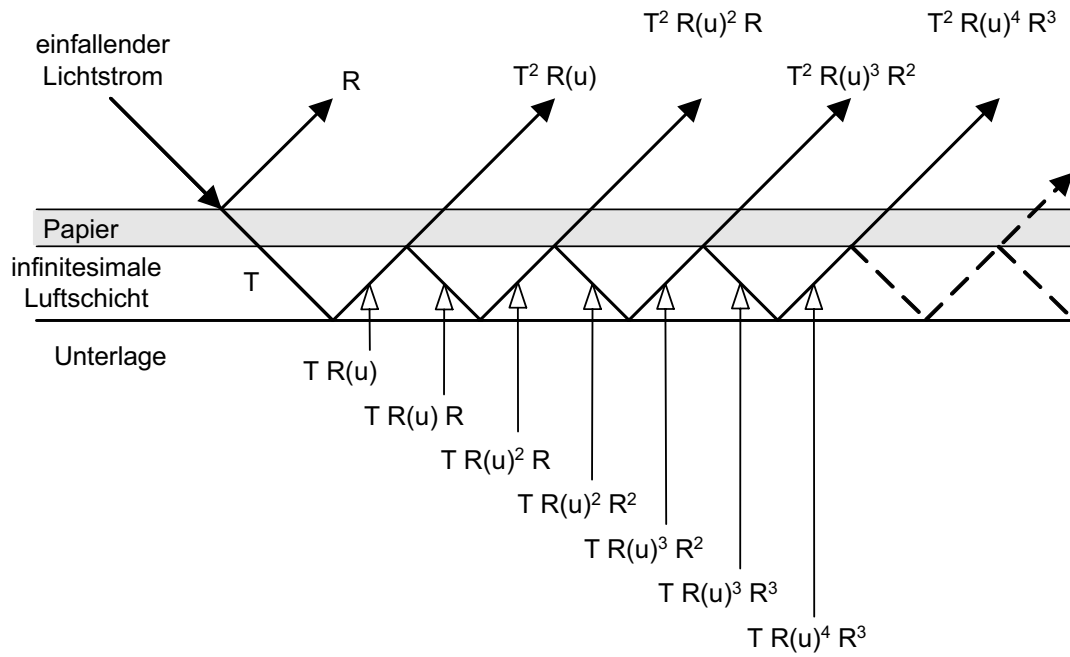


Abb. 3-1: Reflexion und Transmission am einzelnen Papierblatt

Ohne die Berücksichtigung der Zwischenreflexionen zwischen Papier und Unterlage ergibt sich für die Gesamtreflexion R_{ges} :

$$R_{ges} = R + T^2 R(u) \quad (3-1)$$

Aufgelöst nach T folgt:

$$T = \sqrt{\frac{R_{ges} - R}{R(u)}} \quad (3-2)$$

Der so berechnete Wert für die Transmission ist aber nur ein Näherungswert. Bezieht man die Zwischenreflexionen mit ein, resultiert die folgende unendliche Reihe.

$$R_{ges} = R + T^2 R(u) \{ 1 + R(u) R + R(u)^2 R^2 + R(u)^3 R^3 + \dots \} \quad (3-3)$$

Mit $\sum_{q=0}^{\infty} x^q = \frac{1}{1-x}$ für $|x| < 1$ [68] und wegen $R(u) < 1$ und $R < 1$ folgt:

$$R_{ges} = R + T^2 R(u) \frac{1}{1 - R(u) R} \quad (3-4)$$

$$(R_{ges} - R) \frac{1 - R(u) R}{R(u)} = T^2 \quad (3-5)$$

$$T = \sqrt{(R_{ges} - R) \left(\frac{1}{R(u)} - R \right)} \quad (3-6)$$

Werden sehr viele Blätter übereinander gelegt, gehen sowohl R_{ges} als auch $R(u)$ in den Eigenreflexionsfaktor R_∞ über, und es gilt:

$$T = \sqrt{(R_\infty - R) \left(\frac{1}{R_\infty} - R \right)} \quad (3-7)$$

Die direkte Messung der Transmission ist jedoch sehr schwierig, darüber hinaus lassen sich bei sehr transparenten Papieren die Erzeugung eines opaken Papierstapels und damit die Messung von R_∞ nur sehr schwer realisieren. Schmidt entwickelte daher eine Methode, R_∞ auf sehr einfache Weise rechnerisch gemäß folgender Gleichung zu ermitteln [66/67]:

$$R_\infty = R_1 + \frac{(R_2 - R_1)^2}{(R_2 - R_1) - (R_3 - R_2)} \quad (3-8)$$

mit $R_{1/2/3}$: Reflexionsfaktor von 1/2/3 Blättern über schwarzem Untergrund

Mit dem ermittelten Wert für R_∞ lassen sich anschließend der Streu- und der Absorptionskoeffizient berechnen.

Betrachtet man nun nicht ein einzelnes Papierblatt, sondern einen Stapel aus beliebig vielen Blättern, ergibt sich die in **Abb. 3-2** dargestellte Situation.

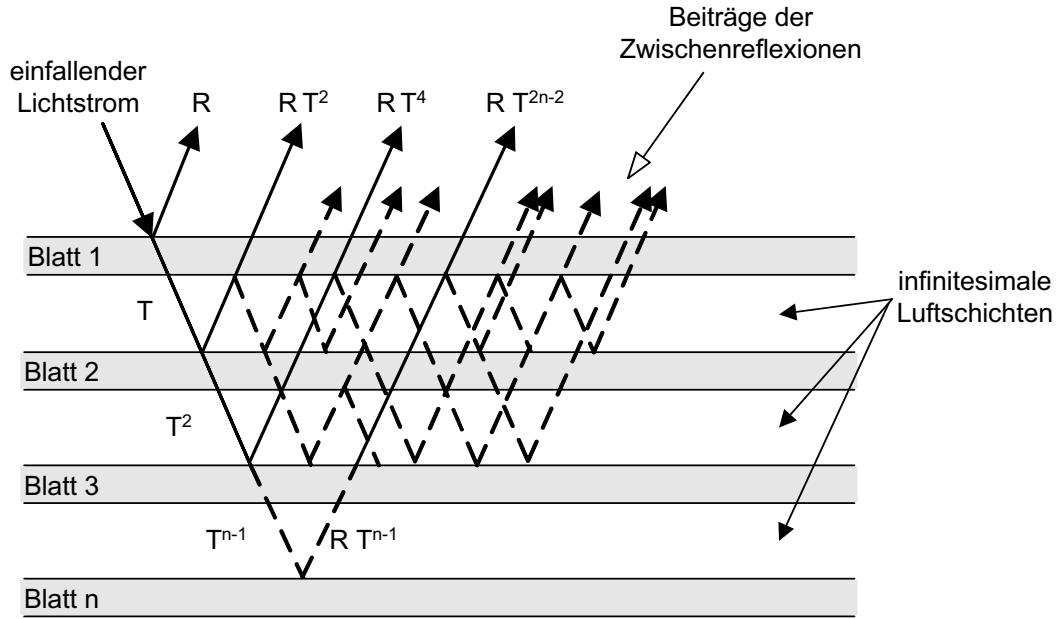


Abb. 3-2: Reflexion und Transmission am Blattstapel

Aufgrund der Vielzahl der zwischen den Blättern reflektierten Lichtströme ergibt sich als Gesamtremission eine Summe aus sehr vielen Einzelkomponenten. Schmidt zeigte, dass für die Remission R_q an q Blättern gilt [67]:

$$R_q = R + R T f + R T f^3 + R T f^5 + \dots + R T f^{2q-3} \quad (3-9)$$

mit R, T : Reflexions- bzw. Transmissionsgrad eines Einzelblattes

$$f = \frac{T}{1 - R^2}$$

(3-9) lässt sich unter Beachtung des Konvergenzkriteriums für geometrische Reihen auch schreiben als:

$$R_q = R + R T f \frac{1 - f^{2q-2}}{1 - f^2} \quad \text{für } |f^2| < 1 \quad (3-10)$$

Lässt man die Zahl der Blätter sehr groß werden, gilt also $q \rightarrow \infty$, ergibt sich der Eigenreflexionsfaktor R_∞ zu:

$$R_{\infty} = R + RT \frac{f}{1 - f^2} \quad (3-11)$$

Mit der Kenntnis des Reflexions- und Transmissionsgrad eines Einzelblattes lässt sich also der Eigenreflexionsfaktor bestimmen.

3.2.3 Kubelka-Munk-Theorie

3.2.3.1 Voraussetzungen zur Anwendbarkeit der Kubelka-Munk-Theorie

Unter verschiedenen Theorien, welche die optischen Vorgänge in trüben Medien behandeln, hat sich die Theorie von Kubelka und Munk am weitesten verbreitet. Kubelka und Munk untersuchten in ihrer grundlegenden Arbeit das Abdeckverhalten von Farbanstrichen [1]. Insbesondere die Frage nach der für die vollständige Abdeckung des Untergrunds erforderlichen Anstrichdicke stand dabei im Mittelpunkt. Kubelka und Munk bezogen sich bei ihren Ausführungen auf unbunte, also weiße oder hellgraue Farben, sodass eine Übertragung ihrer Überlegungen auf Papier möglich war und einige Zeit später auch erfolgreich durchgeführt wurde. Streng genommen gilt die Kubelka-Munk-Theorie allerdings nur unter bestimmten Voraussetzungen. Die Beleuchtung darf nicht gerichtet sein, sondern muss eine diffuse Verteilung aufweisen und mit monochromatischem Licht erfolgen. Auch die Probe selbst unterliegt verschiedenen Randbedingungen. So muss es sich um einen homogenen, diffus reflektierenden Körper („Lambert-Strahler“) mit planparallelen Begrenzungsflächen handeln, dessen Bestandteile regellos verteilt und sehr viel kleiner als die betrachtete Schichtdicke des Mediums sein müssen. Obwohl Papier diese Voraussetzungen nicht zur Gänze erfüllt, lässt sich die Kubelka-Munk-Theorie trotzdem mit hinreichender Genauigkeit anwenden. Eine Ausnahme bilden dabei jedoch glänzende Papiere, die sich mit der Kubelka-Munk-Theorie wegen der stark verzerrten Rückstrahlcharakteristik nicht hinreichend genau beschreiben lassen.

3.2.3.2 Definition des Lambertstrahlers

Streng genommen muss für die Anwendbarkeit der Kubelka-Munk-Theorie die strahlende Fläche eine isotrope Lichtverteilungskurve aufweisen. Das eingestrahelte Licht wird in diesem Fall von der beleuchteten Fläche ohne eine Vorzugsrichtung wieder remittiert. Senkrecht zur strahlenden Fläche hat die Lichtstärke des abgestrahlten Lichts den Maximalwert I . Blickt man unter einem Winkel φ auf die Fläche, reduziert sich die Lichtstärke auf $I \cos \varphi$. Ein Strahler mit einem solchen, einer Cosinusfunktion folgenden Verlauf der

Lichtstärke wird als Cosinusstrahler oder auch Lambertstrahler bezeichnet [4]. Die Lichtverteilungskurve eines Lambertstrahlers beschreibt somit einen Kreis (in der Fläche) bzw. eine Kugel (im Raum) mit dem Radius $I/2$.

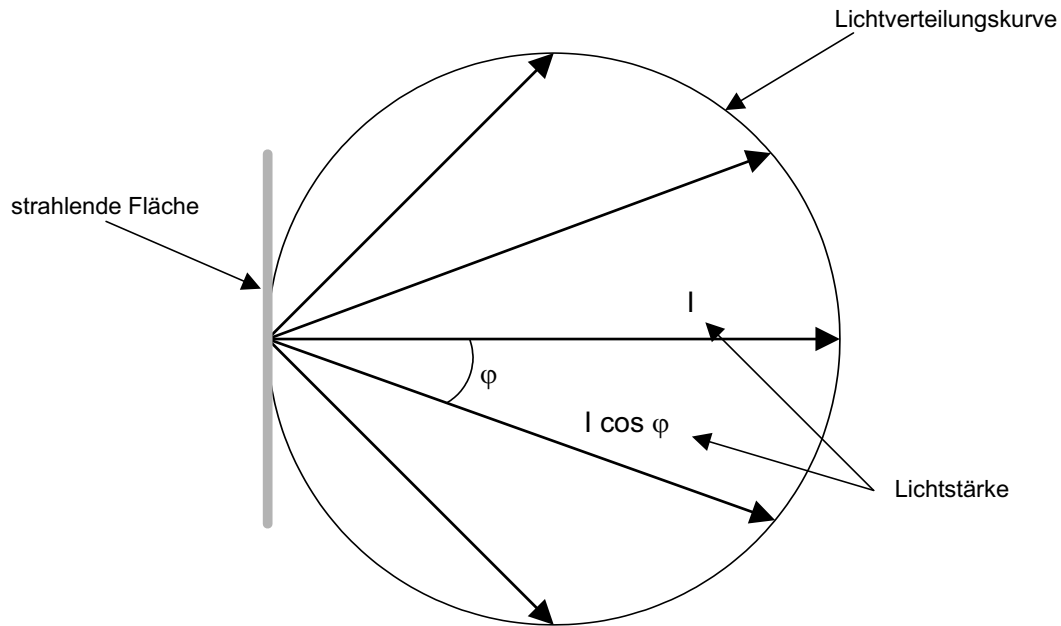


Abb. 3-3: Lambertstrahler

Die Leuchtdichte ist definiert als Quotient aus Lichtstärke und (strahlender) Fläche. Für einen Lambertstrahler ergibt sich für die Leuchtdichte L unter einem beliebigen Beobachtungswinkel φ [4]:

$$L(\varphi) = \frac{I(\varphi)}{A(\varphi)} = \frac{I \cos \varphi}{A \cos \varphi} = \frac{I}{A} = \text{const.} \quad (3-12)$$

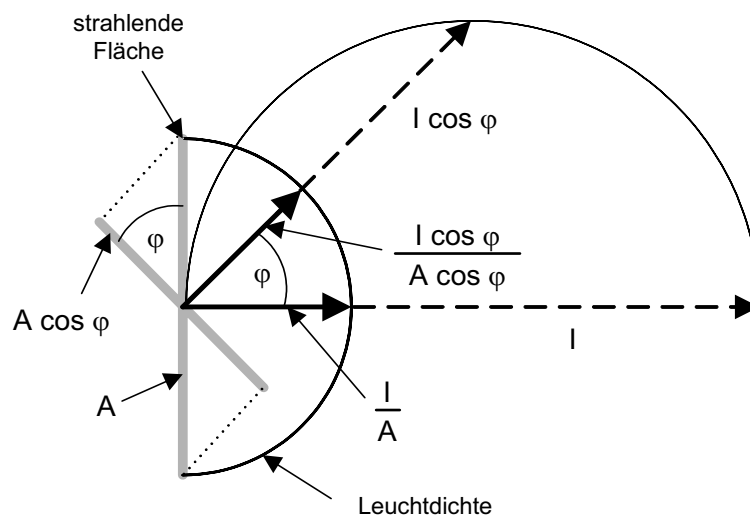


Abb. 3-4: Leuchtdichte eines Lambertstrahlers

Die Leuchtdichte eines Lambertstrahlers ist also über den gesamten Halbraum, in den er ausstrahlt, konstant und weist die Form einer Halbkugel auf. Ein diffuser Reflektor zeigt also auch bei gerichteter Beleuchtung eine halbkugelförmige Rückstrahlcharakteristik.

3.2.3.3 Herleitung der Kubelka-Munk-Gleichungen

Ausgangspunkt der Theorie von Kubelka und Munk ist die Betrachtung der Lichtströme in einem planparallelen Raum, der sich seitlich sehr weit („unendlich“) erstreckt. Innerhalb dieses flächigen Raums wird eine dünne Schicht der Dicke dx betrachtet, die im Abstand x parallel zur Unterlage liegt. Diese dünne Schicht hat, wie jeder andere Bereich des Körpers, den Absorptionskoeffizienten k und den Streukoeffizienten s .

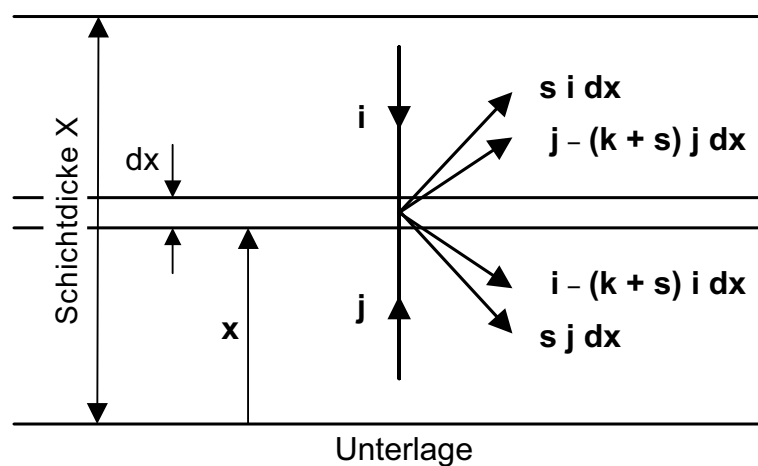


Abb. 3-5: Vereinfachte Darstellung zur Absorption und Streuung in einer infinitesimal dicken Schicht zur Herleitung der Kubelka-Munk-Gleichungen

Fällt ein senkrecht von oben kommender Lichtstrahl der Intensität i durch die Schicht dx , wird er um einen Betrag geschwächt, der proportional zu i , $k + s$ sowie dx ist. Dieser geschwächte Lichtstrom fällt unter weiterer Schwächung auf die Unterlage und wird dort reflektiert. Auf diese Weise wird die Schicht dx vom Lichtstrom j durchflutet, der nach oben gerichtet ist und ebenfalls, analog zu i , proportional zu j , $k + s$ und dx geschwächt wird. Um die Gesamtbilanz der Lichtströme aufzustellen, müssen die aus der Streuung resultierenden Teilströme berücksichtigt werden. Der nach unten gerichtete Lichtstrom i wird demnach um den Betrag $(k + s) \times i \times dx$ verringert und um $s \times j \times dx$ erhöht. Analog wird j um $(k + s) \times j \times dx$ verringert und um $s \times i \times dx$ erhöht. Zu beachten ist die gegen-

sätzliche Orientierung von di und dx , sodass sich die Änderungen folgendermaßen formulieren lassen:

$$-di = -(k + s) i \, dx + s \, j \, dx \quad (3-13)$$

$$dj = -(k + s) j \, dx + s \, i \, dx \quad (3-14).$$

Auf diesen beiden gekoppelten Differenzialgleichungen baut die Theorie von Kubelka und Munk auf.

Eine detaillierte Herleitung der Lösung dieser Differenzialgleichungen findet sich in Anhang A. Als allgemeine Lösung der Gleichungen ergibt sich:

$$R_u = \frac{\frac{1}{R_\infty} (R(u) - R_\infty) - R_\infty \left(R(u) - \frac{1}{R_\infty} \right) e^{\left(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty \right) S m_A}}{\left(R(u) - R_\infty \right) - \left(R(u) - \frac{1}{R_\infty} \right) e^{\left(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty \right) S m_A}} \quad (3-15)$$

mit R_u : Reflexionsfaktor der Probe über der Unterlage,
 $R(u)$: Reflexionsfaktor der Unterlage,
 R_∞ : Eigenreflexionsfaktor der Probe,
 S : dichtebezogener Lichtstreuungskoeffizient der Probe,
 m_A : flächenbezogene Masse der Probe.

Wie im Anhang erläutert, sind in (3-15) die längenbezogenen Koeffizienten s und k in (3-13) und (3-14) aufgrund der Problematik einer genauen Dickenmessung durch die korrespondierenden Koeffizienten S und K mit der Dimension m^2/kg ersetzt worden [69/70].

Liegt die Probe auf einem ideal schwarzen Untergrund, wird $R(u) = 0$, und es folgt für den Reflexionsfaktor R_0 :

$$R_0 = \frac{e^{\left(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty\right) S m_A} - 1}{\frac{1}{R_\infty} e^{\left(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty\right) S m_A} - R_\infty} \quad (3-16)$$

3.2.3.4 Berechnung der Kubelka-Munk-Kenngrößen S und K

Für die Bestimmung der optischen Eigenschaften eines Papiers nach Kubelka-Munk werden in der Regel die Größen R_0 und R_∞ gemessen und anschließend alle weiteren Kenngrößen berechnet. Der Kubelka-Munk-Koeffizient S lässt sich ermitteln, indem man (3-16) nach S auflöst:

$$R_0 = \frac{e^{\left(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty\right) S m_A} - 1}{\frac{1}{R_\infty} e^{\left(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty\right) S m_A} - R_\infty} \quad (3-17)$$

$$\left(\frac{1}{R_\infty} e^{\left(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty\right) S m_A} - R_\infty \right) R_0 = e^{\left(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty\right) S m_A} - 1 \quad (3-18)$$

$$1 - R_0 R_\infty = e^{\left(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty\right) S m_A} \left(1 - \frac{R_0}{R_\infty} \right) \quad (3-19)$$

$$\frac{1 - R_0 R_\infty}{1 - \frac{R_0}{R_\infty}} = e^{\left(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty\right) S m_A} \quad (3-20)$$

$$S = \frac{1}{m_A} \frac{1}{\frac{1}{R_\infty} - R_\infty} \ln \frac{1 - R_0 R_\infty}{1 - \frac{R_0}{R_\infty}} \quad (3-21)$$

K erhält man durch Umstellung von (A-50):

$$\frac{k}{s} = \frac{K}{S} = \frac{(1 - R_\infty)^2}{2 R_\infty} \quad (3-22)$$

$$K = S \frac{(1 - R_\infty)^2}{2 R_\infty} \quad (3-23)$$

Der Zusammenhang zwischen R_∞ sowie S und K ist in **Abb. 3-6** grafisch dargestellt. Es ergibt sich eine gekrümmte Fläche, die ihren größten Gradienten im Bereich kleiner Werte von S zeigt. Hier wird erkennbar, dass sehr helle Papiere mit geringem Streuvermögen außerordentlich empfindlich auf kleine Änderungen des Absorptionsvermögens, wie sie beispielsweise bereits durch geringe Verunreinigungen hervorgerufen werden können, reagieren. Ebenso ist das Erreichen einer vollkommen schwarzen Fläche mit $R_\infty = 0$ nahezu unmöglich, da dies nur für den Grenzfall $K \rightarrow \infty$ und $S \rightarrow 0$ gilt und bereits kleinste Werte von S einen deutlich messbaren Reflexionsfaktor zur Folge haben.

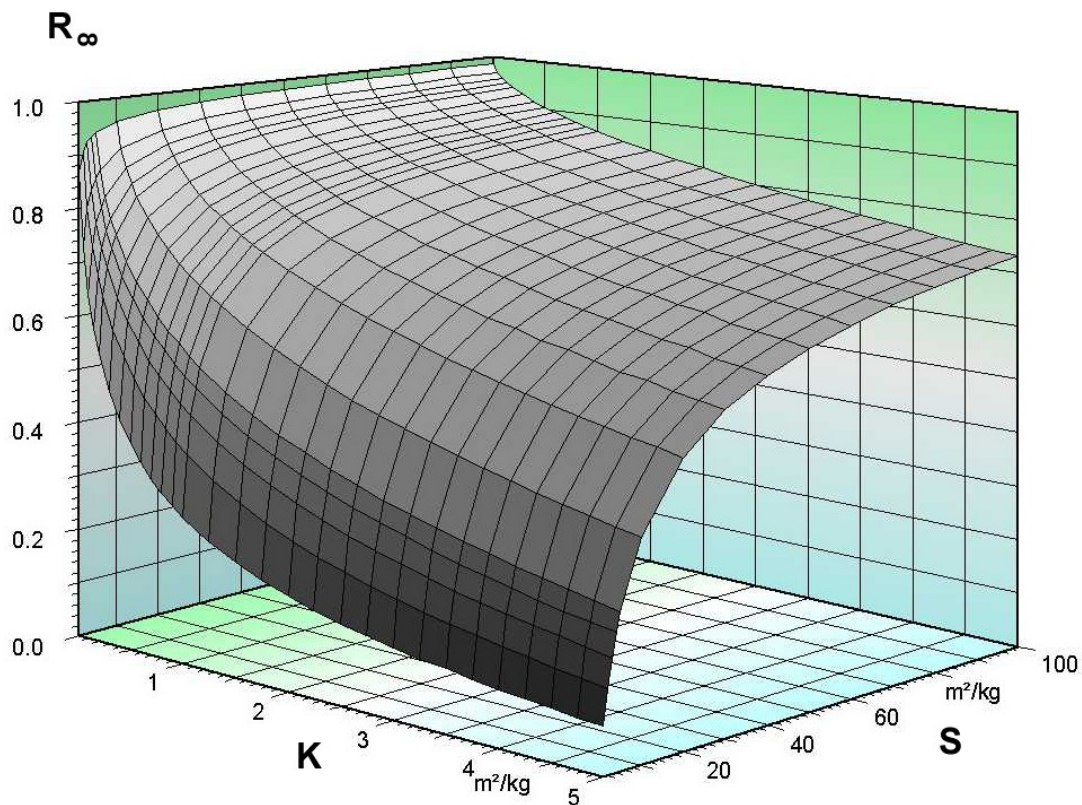


Abb. 3-6: Eigenreflexionsfaktor R_∞ als Funktion der dichtebezogenen Lichtstreu- und Lichtabsorptionskoeffizienten S und K

Die von Kubelka und Munk gefundenen Zusammenhänge sind denen von Stokes äquivalent. Die Materialkennwerte beider Modelle lassen sich, wie Olf zeigte [71], mithilfe geeigneter Gleichungen direkt ineinander überführen.

3.2.3.5 Glanz

Glanz entsteht, wenn das auf eine Oberfläche treffende Licht in eine bevorzugte Richtung reflektiert wird. Denkt man sich die Oberfläche eines makroskopischen Körpers aus vielen mikroskopischen Elementen zusammengesetzt, dann tritt Glanz in solchen Fällen auf, wenn die Orientierung der mikroskopischen Flächenelemente eine Präferenz in eine beliebige Raumrichtung aufweist [72]. Dem gegenüber zeigen bei einem matten Körper die Elemente eine statistisch gleichverteilte Ausrichtung über alle Winkel.

Bei stark glänzenden Papieren lassen sich die Kubelka-Munk-Koeffizienten S und K nicht korrekt berechnen. Der Grund liegt in der Funktionsweise der für die Messung der optischen Eigenschaften verwendeten Reflexionsspektrometer. **Abb. 3-7** zeigt den schematischen Aufbau eines solchen Spektrometers. Die Integrationskugel vergleicht das von der Lichtquelle eingestrahlte Licht und sorgt damit für eine diffuse Beleuchtung der Probe. Der Empfänger am gegenüberliegenden Punkt misst die von der Probe reflektierte Strahlungsintensität in Bezug auf einen ideal mattweißen Körper bzw. einen gegen Abso- lutweiß eingemessenen Kalibrierstandard. Rund um den Empfänger befindet sich eine Glanzfalle, was dazu führt, dass die Probe nur von dem in Abb. 3-7 grau eingefärbten Teil der Integrationskugel beleuchtet wird.

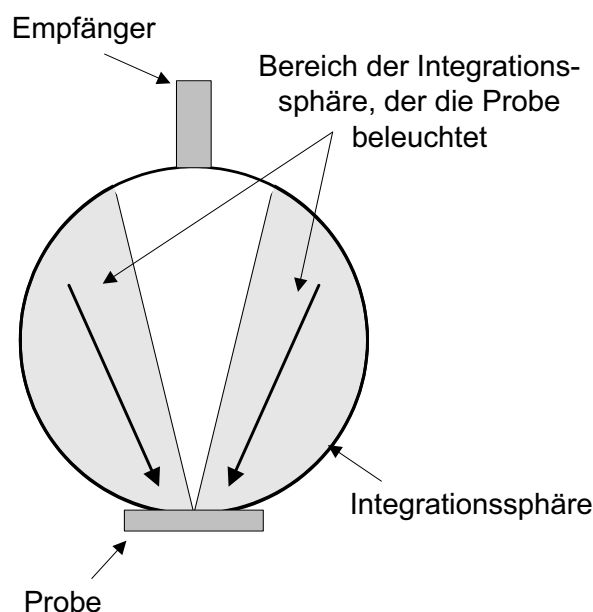


Abb. 3-7: Schematische Darstellung des Aufbaus eines Reflexionsspektrometers [73]

Die Art und Weise, wie die Probe das eingestrahlte Licht wieder zurückwirft, hängt nun aber entscheidend von ihrer Abstrahlcharakteristik ab. In **Abb. 3-8** sind die beiden Grenzfälle der diffusen sowie der regulären Reflexion dargestellt.

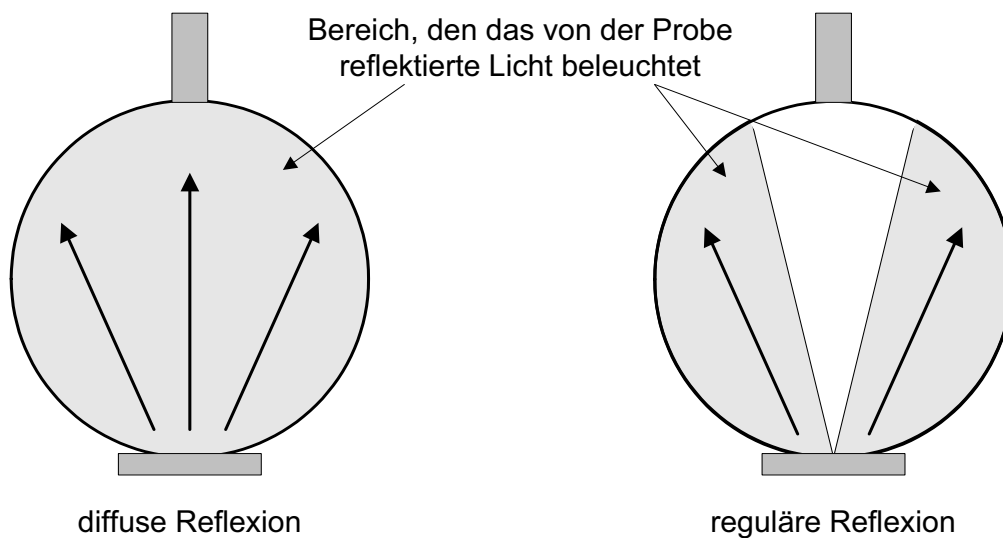


Abb. 3-8: Ideal diffus (links) und regulär (rechts) reflektierende Probe [73]

Obwohl beide Proben das auftreffende Licht vollständig wieder reflektieren, wird der Empfänger höchst unterschiedliche Messwerte anzeigen. Im Fall des diffusen Reflektors, der das Licht gleichmäßig in alle Raumrichtungen emittiert, beträgt der Messwert 100 %, während bei der ideal spiegelnden Probe kein Licht den Empfänger erreicht. Dies ist die Folge der in Abb. 3-7 skizzierten Probenbeleuchtung, die bauartbedingt rund um den Empfänger Lücken aufweist.

In der Praxis lassen sich ideale Reflektoren natürlich nicht realisieren, die oben beschriebenen Effekte sind aber dennoch gut zu beobachten. In **Abb. 3-9** sind die Reflexionskurven zweier nahezu idealer Reflektoren dargestellt, nämlich die eines Spiegels sowie die eines aus Bariumsulfatpulver gepressten Probekörpers, welcher als Kalibrierstandard für den oberen Endpunkt des Messgerätes verwendet wird.

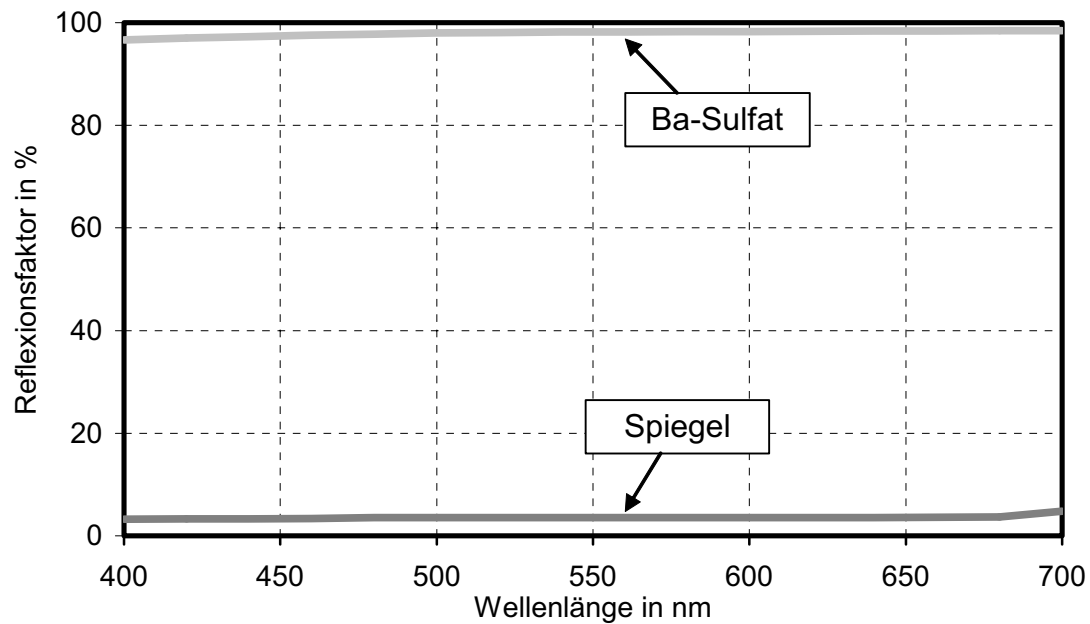


Abb. 3-9: Reflexionskurven eines Weißstandards (Bariumsulfatpulver) und eines Spiegels, ermittelt am Elrepho 2000

Während die Probe aus Bariumsulfat das Licht annähernd ideal diffus reflektiert, wird im Fall des Spiegels lediglich der geringe Anteil registriert, der aufgrund von Unregelmäßigkeiten der Spiegeloberfläche in den Empfänger gelangt.

Die großen Unterschiede, welche die Ermittlung des Reflexionsfaktors bei direkter Beleuchtung eines diffusen und regulären Reflektors ergibt, werden aber fast vollständig nivelliert, sobald ein streuendes Objekt in den Strahlengang gebracht wird. Dies wird anhand der **Abb. 3-10** deutlich. In dieser Grafik sind die Reflexionskurven von Zeitungsdruckpapier dargestellt, und zwar einmal eines einzelnen Blattes, dann eines opaken Stapels und schließlich eines einzelnen Blattes über einem Spiegel sowie über einem Weißstandard.

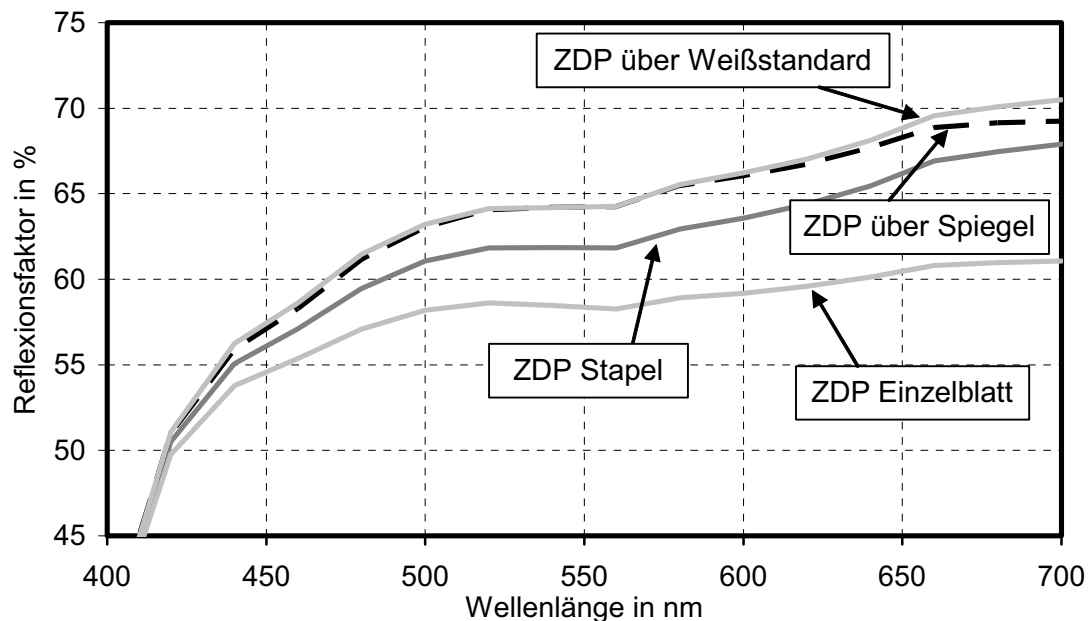


Abb. 3-10: Reflexionskurven eines Zeitungsdruckpapiers (ZDP) über wechselndem Untergrund, ermittelt am Elrepho 2000

Die Reflexionskurven des Einzelblattes über dem Weißstandard und dem Spiegel sind, abgesehen vom langwelligen roten Bereich, praktisch deckungsgleich. Das durch das Papier tretende Licht wird von beiden Unterlagen fast vollständig zurückgeworfen und erhöht den Betrag des Reflexionsfaktors eines einzelnen Blattes beträchtlich. Offensichtlich ist es dabei ohne Belang, ob die Unterlage diffus oder regulär reflektiert. Das Papierblatt weist trotz seiner vergleichsweise geringen flächenbezogenen Masse von lediglich 40 g/m^2 ein ausreichend großes Streuvermögen auf, um auch das vom Spiegel kommende Licht beim Durchqueren effektiv zu streuen, sodass beim Austritt aus der Paperoberfläche diffuse Reflexionsverhältnisse erreicht werden.

Da das Zeitungsdruckpapier das Licht nicht nur streut, sondern einen Teil auch absorbiert, kann bei der Stapelmessung nicht das gleiche Reflexionsvermögen erzielt werden wie bei der Messung über nahezu idealem Reflektor. Aus diesem Grund liegen die Reflexionskurven des Einzelblattes über dem Spiegel bzw. Weißstandard auch höher als die des Papierstapels. Im letzteren Fall wird der durch das oberste Blatt tretende Lichtstrom in den darunter liegenden Schichten durch Absorptionsvorgänge geschwächt, sodass im Vergleich zum Spiegel und dem Weißstandard ein geringerer Anteil auf der Oberseite wieder austreten kann.

Mithilfe von (3-15) ist es möglich, aus den gemessenen Werten der Reflexionsfaktoren des Zeitungsdruckpapiers und des Weißstandards den zu erwartenden Reflexionsfaktor des Systems aus Weißstandard und darüber liegendem Einzelblatt zu berechnen. Im Gegensatz zu Angaben anderer Autoren [74/75], die bei einem derartigen Vergleich über signifikante Abweichungen berichten, ergibt sich bei dem in Abb. 3-10 dargestellten Fall zwischen berechnetem und gemessenem Wert ein Fehler von weniger als 1 %. Dies lässt darauf schließen, dass im Falle diffuser Reflektoren die Anwendung der Kubelka-Munk-Theorie zur Berechnung der optischen Eigenschaften zu verlässlichen Ergebnissen führt.

3.2.4 Weitere Modelle zur Beschreibung der optischen Eigenschaften

Die Mehrzahl der Arbeiten, die eine Modellierung der optischen Eigenschaften zum Inhalt haben, basieren auf den Stokes-Gleichungen (3-24) und (3-25), welche die Berechnung des Reflexions- und Transmissionsvermögens R_{q+1} und T_{q+1} eines Stapels aus $q + 1$ Schichten auf Basis der entsprechenden Werte R_i und T_i der einzelnen Schichten ermöglichen [3/76].

$$T_{q+1} = \frac{T_1 T_q}{1 - R_1 R_q} \quad (3-24)$$

$$R_{q+1} = R_1 + \frac{T_1^2 R_q}{1 - R_1 R_q} \quad (3-25)$$

Mit diesen Gleichungen lassen sich prinzipiell beliebige Schichtsysteme berechnen, wenn alle R_i und T_i bekannt sind.

Das Modell von Scallan und Borch [77] geht von der Annahme aus, dass ein Papierblatt aus einzelnen Lagen aufgebaut ist, die jeweils einer Faserdicke entsprechen. Für den Reflexionsfaktor einer Zellulosefaser in Luft ermittelten die Autoren einen Wert von $R = 9\%$. Mittels Stickstoffabsorption bestimmten sie die Anzahl der Lagen und konnten daraus den Reflexionsfaktor des Blattes berechnen. Auf diese Weise lassen sich die optischen Grundeigenschaften auf den morphologischen Aufbau des Papiers zurückführen. Die diesen Berechnungen zugrunde liegenden Gleichungen entsprechen dabei denen, die von Kubelka für geschichtete Systeme abgeleitet wurden [78/79].

Einen anderen Ansatz verfolgt das Modell von Carlsson, Persson et al. [80]. Als Ausgangspunkt wählten sie eine Monte-Carlo-Simulation, bei der die Lichtausbreitung im Papier sowie die Streu- und Absorptionsprozesse auf die Gesetze der Wahrscheinlichkeit zurückgeführt werden. Das Papier ihres Modells weist keine definierte Struktur auf, vielmehr treffen die Photonen entlang ihres Weges mit gewissen Wahrscheinlichkeiten auf die verschiedenen Papierbestandteile Fasern, Fein- und Füllstoffe sowie Hohlräume. Durch Laufzeitmessungen von Laserpulsen ermittelten die Autoren eine mittlere Wegstrecke der Photonen im Papier, welche etwa der 10fachen Blattdicke entspricht. Wie hoch die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten sind, hängt dabei stark von der Zusammensetzung und dem Verdichtungsgrad des Papiers ab.

Eine Erweiterung des Modells von Scallan und Borch entwickelte Leskelä [81/82]. Anstatt eines Aufbaus aus diskreten Lagen geht Leskelä von einer einzigen Schicht aus, in der die Intensität des Lichts entsprechend dem Beer'schen Gesetz exponentiell abnimmt. Während das Modell von Scallan und Borch lediglich auf reine Faserstoffmischungen anwendbar ist, kann beim Modell von Leskelä mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation auch der Einfluss von Partikeln mit anderen Brechungsindizes erfasst werden. Auf diese Weise können auch Füllstoffe sowie die Auswirkungen unterschiedlicher Porenstrukturen in die Berechnungen einfließen.

Die bisher vorgestellten Modelle gingen implizit davon aus, dass in den betrachteten Systemen die Absorption vernachlässigbar ist. Hat man es hingegen mit stark absorbierenden Substanzen wie etwa ungebleichtem Kraftzellstoff oder gefärbten Papieren zu tun, muss die Absorption in den Berechnungen berücksichtigt werden. In diesem Fall geht der rein reelle Brechungsindex n in einen komplexen Brechungsindex n' der folgenden Form über [3/8/76]:

$$n' = n + i k_{\text{Ext}} \quad (3-26)$$

mit k_{Ext} : Extinktionskoeffizient

Der Extinktionskoeffizient ergibt sich dabei aus dem Beer'schen Extinktionsgesetz, das die Schwächung eines Lichtstroms in einem absorbierenden Medium beschreibt [4]:

$$P(x) = P_0 e^{-K_{\text{Ext}} x} \quad (3-27)$$

$$K_{\text{Ext}} = \frac{4\pi}{\lambda} k_{\text{Ext}} \quad (3-28)$$

mit $P(x)$: Lichtleistung an der Stelle x
 P_0 : Lichtleistung des eingestrahnten Lichts
 K_{Ext} : Extinktionskonstante
 x : Wegstrecke des Lichts im absorbierenden Medium
 λ : Wellenlänge des eingestrahnten Lichts

Die Schwächung des Lichts erfolgt demnach exponentiell und hängt darüber hinaus von der Wellenlänge ab.

Der Realteil des komplexen Brechungsindex bestimmt gemäß dem Snellius'schen Brechungsgesetz die Reflexion und Brechung eines Lichtstrahls an der Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlichen Brechzahlen. Mit dem Imaginärteil werden die Auswirkungen von Absorptionsprozessen hinzugefügt.

Die Kubelka-Munk-Koeffizienten S und K sind Materialeigenschaften, die von den optischen Eigenschaften der einzelnen Papierbestandteile abhängen [83]. Da cellulosisches Fasermaterial den Hauptbestandteil im Papier stellt, sind die Reflexionseigenschaften der Faserwände demnach die maßgebenden Faktoren. Befinden sich innerhalb der Zellwände Chromophore mit ausgeprägten Absorptionsbanden, wird die Reflexion sowohl an der Oberfläche der Faserwände als auch in ihrem Innern beeinflusst. Das Resultat ist eine Änderung des Rückstreuvermögens und damit des Streukoeffizienten S . Daher können S und K nicht als unabhängige Größen aufgefasst werden, sondern sind, zumindest im Fall nicht vernachlässigbarer Absorption, als Variablen mit gegenseitiger Wechselwirkung zu betrachten [84/85].

Beispiele für Chromophore im Papier sind Lignin und Farbstoffe. Bei starker Absorption, wie sie z. B. Lignin im blauen Wellenlängenbereich erkennen lässt, ist die Berechnung des

Streukoeffizienten S fehlerbehaftet. Die Höhe des Fehlers in S richtet sich dabei nach dem Wert des Absorptionskoeffizienten K . Rundlöf und Bristow fanden eine Beziehung, nach der sich, beginnend bei einem Wert von etwa $7 - 8 \text{ m}^2/\text{kg}$ für K , der Wert von S mit steigendem K nahezu linear verringert [84]. Der störende Effekt macht sich also bei niedriger bis moderater Absorption nicht signifikant bemerkbar, führt aber bei starker Absorption zu großen Abweichungen. So ermittelten die Autoren z. B. bei einem Wert von $15 \text{ m}^2/\text{kg}$ für K einen Fehler ΔS von etwa 10 %, der sich für $K = 20 \text{ m}^2/\text{kg}$ auf knapp 15 % erhöht. In Fällen mit solch hoher Absorption verliert das Kubelka-Munk-Modell demnach seine Anwendbarkeit.

Ob die Kubelka-Munk-Beziehungen anwendbar sind oder nicht, hängt in erster Linie vom Extinktionskoeffizienten k_{Ext} ab [76]. Anhand (3-27) und (3-28) lässt sich ermitteln, wie groß k_{Ext} für ein Papier mit gegebener Transmission T und Dicke x bei einer bestimmten Lichtwellenlänge λ ist. Für $T = 0,5$, $x = 0,1 \text{ }\mu\text{m}$, also durchaus üblichen Größenordnungen bei grafischen Papieren, sowie $\lambda = 560 \text{ nm}$ ergibt sich für k_{Ext} ein Wert von $3,1 \times 10^{-4}$. Bei Extinktionskoeffizienten dieser Größe wird der Streukoeffizient aber noch nicht wesentlich beeinflusst, erst bei $k_{Ext} > 10^{-3}$ sind merkliche Abweichungen zu erwarten [76/81]. Die Anwendbarkeit des Modells von Kubelka und Munk ist somit für den überwiegenden Teil der grafischen Papiere gewährleistet.

3.3 Bestimmung optischer Eigenschaften

3.3.1 Theoretische Grundlagen

Die meisten Papiere setzen sich aus verschiedenen Rohstoffen mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften zusammen. So weisen Holzstoffe andere Streu- und Absorptionseigenschaften auf als Zellstoffe, und die optischen Eigenschaften von Füllstoffen unterscheiden sich wieder erheblich von denen der Faserstoffe. Betrachtet man schließlich gestrichene Papiere, ergeben sich durch den schichtförmigen Aufbau wiederum andere Verhältnisse.

Die optischen Eigenschaften werden ermittelt, indem zunächst mithilfe eines Reflexionsspektrometers die spektralen Verläufe der beiden Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ gemessen werden. Diese Messgrößen dienen anschließend als Grundlage zur Berechnung weiterer Kenngrößen, wobei die Rechenvorschriften in verschiedenen Normen festgelegt sind [86/87/88]. Diese Rechenvorschriften basieren auf der Anwendung der Kubelka-Munk-

Theorie und unterliegen daher den in Kap. 3.2.3.1 erwähnten Einschränkungen. Setzt man die Anwendbarkeit der Kubelka-Munk-Theorie voraus, dann lassen sich die optischen Eigenschaften von Papieren gemäß der im Folgenden beschriebenen Verfahren berechnen.

3.3.2 Optische Eigenschaften von Einschichtsystemen

Als Einschichtsysteme lassen sich solche Papiere auffassen, bei denen die verschiedenen Komponenten gleichmäßig über die Dicke verteilt vorliegen. Das trifft in der Regel auf alle ungestrichenen Papiere zu, sofern sie nicht aus mehreren Lagen zusammengegaustcht sind. Es konnte gezeigt werden, dass sich die resultierenden Werte des dichtebezogenen Streu- sowie des dichtebezogenen Absorptionskoeffizienten aus den Koeffizienten der eingesetzten Rohstoffe berechnen lassen [89/90]. Dazu werden die Streu- und Absorptionskoeffizienten der Rohstoffe massengewichtet aufsummiert:

$$S_{\text{ges}} = \sum_i S_i \mu_i \quad (3-29)$$

$$K_{\text{ges}} = \sum_i K_i \mu_i \quad (3-30)$$

mit $S_{\text{ges}}/K_{\text{ges}}$: dichtebezogener Streu-/Absorptionskoeffizient der Stoffmischung
 S_i/K_i : dichtebezogener Streu-/Absorptionskoeffizient der i-ten Rohstoffkomponente
 μ_i : Massenanteil der i-ten Rohstoffkomponente

Zu beachten ist bei der Berechnung gemäß (3-29) aber, dass der Streukoeffizient von Füllstoffen mit zunehmendem Anteil im Papier abnimmt [91]. Die Ursache liegt in einer Agglomeration der Füllstoffpartikel bei steigenden Zugabemengen [76]. Das führt dazu, dass die streuende Oberfläche der Füllstoffe nicht in dem Ausmaß zunimmt, wie es rechnerisch anhand des Massenanteils im Papier zu erwarten wäre. Die Effektivität der Füllstoffe, ausgedrückt als Zunahme des Streukoeffizienten, sinkt damit nahezu linear mit dem Füllstoffgehalt im Papier [91]. Da mit zunehmendem Füllstoffanteil die Zahl der Faser-Faser-Bindungen und damit das Streuvermögen des Faseranteils zurückgeht, kann bei hohen Füllstoffgehalten der Streukoeffizient bei einer Erhöhung des Füllstoffanteils sogar sinken [92]. Ob und wann dieser Umkehrpunkt erreicht wird, hängt in erster Linie vom Pigment-

typ ab, da aufgrund der Unterschiede in Form, Größe und Brechungsindex jedes Pigment einen anderen Verlauf hinsichtlich der Entwicklung des Streukoeffizienten aufweist.

3.3.3 Optische Eigenschaften von Mehrschichtsystemen

3.3.3.1 Modellierung der optischen Eigenschaften von Mehrschichtsystemen

Zur Modellierung von Mehrschichtsystemen sind grundsätzlich die gleichen Beziehungen anwendbar wie zur Beschreibung eines Blattstapels, also etwa die Stokes-Gleichungen (3-24) und (3-25). Hier ist lediglich darauf zu achten, dass die verschiedenen Schichten sehr unterschiedliche Werte für Reflexion und Transmission aufweisen können.

Sollen die optischen Eigenschaften gestrichener Papiere bestimmt werden, müssen demzufolge die Kennwerte der Strichschicht bekannt sein. Insbesondere das Streuvermögen ist von Interesse, da nur ein hohes Streuvermögen der zumeist sehr dünnen Strichschicht die optischen Eigenschaften des Gesamtsystems merklich verbessern kann. Das Maß der Lichtstreuung in der Strichschicht wird dabei von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst. Bauer [93] sowie Lepoutre und Means [94] erkannten schon früh, dass die Porenstruktur ein entscheidender Parameter ist. Spätere Arbeiten von Alince et al. [95/96] zeichnen ein differenzierteres Bild der Zusammenhänge. Dabei stellte sich heraus, dass nur solche Poren einen Beitrag zur Lichtstreuung im sichtbaren Wellenlängenbereich leisten, die eine bestimmte Größe aufweisen. Sehr kleine Poren mit Durchmessern unter 100 nm können sichtbares Licht nicht effektiv streuen, ebenso große Poren von über 600 nm Durchmesser. Am effektivsten streuen Poren, deren Durchmesser etwa der halben Wellenlänge des sichtbaren Lichts entspricht.

Die sich im Strich ausbildende Porenstruktur ist wiederum eine Funktion des Typs sowie der Form und Größenverteilung der Pigmente [76/97]. Das höchste Streuvermögen wird nach Järnström et al. [98] mit Partikeln erzielt, die einen Durchmesser von etwa 0,5 μm aufweisen. Daneben hat aber auch die Art und Zugabemenge des Bindemittels einen Einfluss. So konnten Stanislawska und Lepoutre [99] zeigen, dass nur bei geringen Bindemittelanteilen die Porenstruktur in erster Linie von den Pigmenten bestimmt wird. Steigt der Anteil des Binders auf etwa 20 %, wird das Porensystem von der Bindemittelmatrix dominiert. Gleichzeitig sinkt das Porenvolumen, da die kleineren Bindemittelpartikel größere Hohlräume besser füllen können als Pigmente [100].

Wegen der vielen Wechselwirkungen der verschiedenen Strichbestandteile erweist sich eine Modellierung der Strichschicht als schwierig. Videl et al. [101] versuchten mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation die wesentlichen Eigenschaften wie Porosität, Porengröße und Mikrorauhigkeit der Oberfläche zu modellieren. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass eine verlässliche Modellierung nur bei gewissen Einschränkungen möglich ist. Dazu zählt die Forderung, dass die Partikel eine Kugelform aufweisen und inkompressibel sein müssen. Ferner dürfen die Partikel sich nicht zu Clustern zusammenballen. Sind diese Voraussetzungen nicht erfüllt, ergeben sich im Vergleich zu experimentell ermittelten Ergebnissen zu große Abweichungen.

Chinga und Helle [102] entwickelten eine Methode, den räumlichen Aufbau einer Strichschicht zu rekonstruieren. Dazu trugen sie den Strich schichtweise ab und erstellten jeweils eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Oberfläche. Die aufgenommenen Bilder wurden anschließend zu einem dreidimensionalen Modell zusammengesetzt. Auf diese Weise konnte die Verteilung der Pigmente und Hohlräume innerhalb der Strichschicht visualisiert werden.

3.3.3.2 Berechnung der optischen Eigenschaften von Mehrschichtsystemen

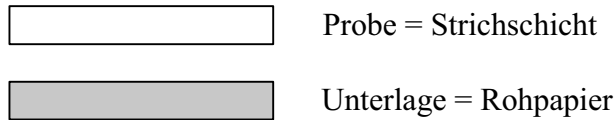
Gestrichene Papiere lassen sich aufgrund ihres schichtförmigen Aufbaus nicht mithilfe der einfachen Summenformeln (3-29) und (3-30) berechnen. Setzt man die Anwendbarkeit der Kubelka-Munk-Theorie voraus, kann zur Berechnung auf (3-15) zurückgegriffen werden:

$$R_u = \frac{\frac{1}{R_\infty}(R(u) - R_\infty) - R_\infty \left(R(u) - \frac{1}{R_\infty} \right) e^{\left(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty \right) S_{m_A}}}{(R(u) - R_\infty) - \left(R(u) - \frac{1}{R_\infty} \right) e^{\left(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty \right) S_{m_A}}} \quad (3-31).$$

Diese Gleichung ermöglicht es, mit der Kenntnis der Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ sowie der flächenbezogenen Massen der einzelnen Schichten die entsprechenden Werte des Gesamtsystems zu berechnen. Im Folgenden ist schematisch die Vorgehensweise dieses Berechnungsgangs für ein einseitig mit einer Strichschicht belegtes Papier gezeigt.

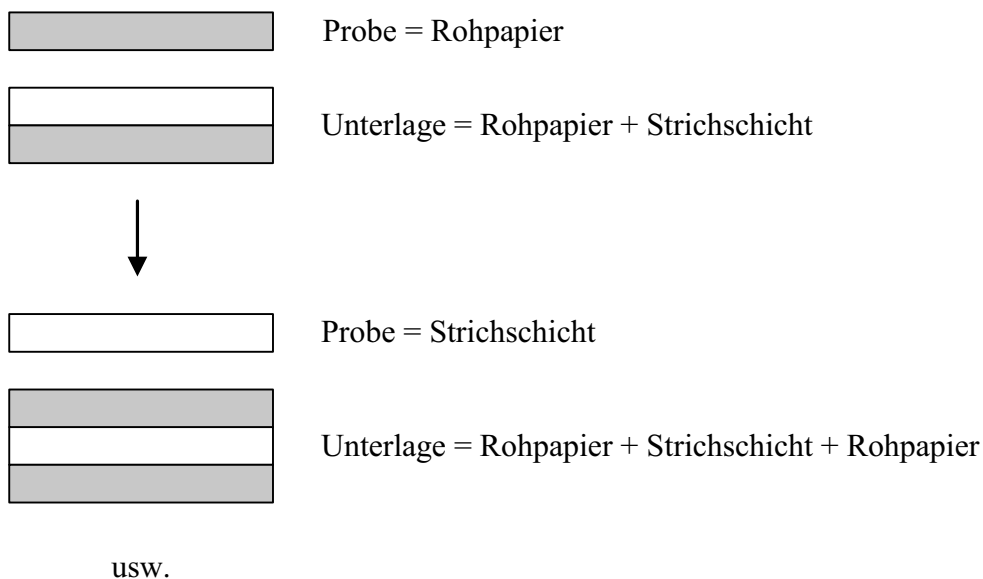
- Ermittlung von R_0

Zunächst wird das R_0 des einseitig mit einer Strichschicht belegten Rohpapiers berechnet, indem in (3-31) die Werte R_∞ , S und m_A der oben aufliegenden Probe (d. h. der Strichschicht) sowie für $R(u)$ das R_0 des Rohpapiers eingesetzt werden.



- Hinzufügen weiterer Schichten

Anschließend werden schrittweise weitere Schichten hinzugefügt. Dabei wechseln sich jeweils eine Rohpapier- und Strichschicht ab, sodass am Ende ein „unendlich dicker“ Stapel des einseitig mit einer Strichschicht belegten Papiers entsteht.



Für R_∞ , S und m_A werden jeweils die Werte der neu hinzugefügten Schicht verwendet, während für $R(u)$ der Reflexionsfaktor des im vorhergehenden Schritt berechneten Schichtsystems eingesetzt wird. Nach einigen Durchläufen dieser Art ändert sich das Resultat des Reflexionsfaktors nicht mehr, womit der Wert für den Eigenreflexionsfaktor R_∞ erreicht ist. Dass die Modellrechnung mit den tatsächlich ermittelten Messwerten in guter Übereinstimmung steht, wird in Kap. 6.2 gezeigt.

Analog sind auch beidseitig beschichtete Papiere berechenbar, indem die Reihenfolge der Schichten entsprechend angepasst wird. Auf diese Weise lassen sich für ein beliebiges Schichtsystem der spektrale Verlauf von R_0 und R_∞ sowie die daraus berechneten Kubelka-Munk-Koeffizienten S und K bestimmen.

4 Porengrößenanalyse mittels Quecksilber-Porosimetrie

4.1 Methode zur Bestimmung der Porenstruktur und Einfluss der Porenstruktur auf Papiereigenschaften

Die optischen Eigenschaften des Rohpapiers werden ebenso wie die Absorptionseigenschaften wesentlich von der Porenstruktur des Blatts bestimmt [103/104]. Diese Porenstruktur bildet sich während des Papierherstellungsprozesses durch die Überlagerung verschiedenartiger, auf die Fasern wirkender Kräfte aus. In der Blattbildungszone der Papiermaschine werden die Fasern zunächst durch mechanische Kräfte aneinander angenähert. Mit zunehmender Entwässerung können sich polare und unpolare Bindungen ausbilden, die schließlich zur Etablierung eines dreidimensionalen Fasernetzwerks führen [105]. Die Stärke der Faser-Faser-Bindungen und die Größe der Kontaktfläche zwischen den Fasern bestimmen die Festigkeiten des Gefüges, während die Porenstruktur von der räumlichen Anordnung der Fasern geprägt wird. Neben Länge und Flexibilität ist der Fibrillierungsgrad der Fasern maßgeblich für die Porenstruktur verantwortlich. Eine stärkere Fibrillierung, die zumeist mit einer Flexibilisierung der Fasern einhergeht, hat die Generierung kleinerer Poren zur Folge. Ebenso führt auch ein höherer Fein- und Füllstoffgehalt zu einem Anstieg des Anteils kleinerer Poren [106].

Die Porengrößenverteilung bestimmt letztendlich das Eindringverhalten von Partikeln unterschiedlicher Größe und die Absorption polarer und unpolarer Fluide wie Wasser, Streich- oder Druckfarbe [63]. Liegt ein raues Papier mit einer grobporigen Struktur vor, kann ein größerer Anteil der Bestandteile von Streich- oder Druckfarbe ins Papier eindringen. Im Fall des Streichprozesses bedeutet das eine schlechtere Abdeckung des Rohpapiers durch die Strichschicht mit den daraus folgenden Beeinträchtigungen der Oberflächen- und Bedruckbarkeitseigenschaften [107]. Rohpapiere mit hohem Holzstoffanteil, dessen Fasern nicht ausreichend fibrilliert sind, sind für diese Art Schwierigkeiten besonders anfällig.

Voraussetzung für die Beurteilung der Porengrößenverteilung ist eine verlässliche Messmethode, welche die erforderlichen Informationen zur Verfügung stellt. Grundsätzlich sind verschiedene Verfahren möglich, die auf unterschiedlichen physikalischen Vorgängen beruhen. Neben Durchströmverfahren, die auf dem Widerstand basieren, den die Probe einem flüssigen oder gasförmigen Medium entgegensetzt, kommen hauptsächlich Verdrängungsverfahren zum Einsatz, bei denen die Hohlräume durch Flüssigkeiten gefüllt werden

[104/108]. Letztere Verfahren lassen sich weiter unterteilen in direkte und indirekte Methoden.

Bei den indirekten Verfahren wird die Probe zunächst mit einer Flüssigkeit gesättigt und anschließend eine zweite Prüfflüssigkeit, die mit der ersten nicht mischbar sein darf, dazu verwendet, die erste Flüssigkeit sukzessive aus den Poren zu verdrängen. Dem stehen die direkten Verdrängungsverfahren gegenüber, deren prominentester Vertreter die Quecksilberporosimetrie ist. Bei dieser Methode wird unter definierten Druckbedingungen Quecksilber in die vorher evakuierte Probe gepresst. Anhand des anliegenden Drucks sowie des indruierten Quecksilbervolumens lässt sich die Größe der gerade gefüllten Poren berechnen. Da Quecksilber keine Faserquellung verursacht, treten auch keine Fehlmessungen durch Quellungsvorgänge auf, die unweigerlich mit jeder wasserbasierenden Methode verbunden sind.

4.2 Theoretische Grundlagen des Messverfahrens

Das Verfahren der Quecksilber- Porosimetrie zur Ermittlung der Porengrößenverteilung poröser Medien basiert auf der Kapillartheorie zur Flüssigkeitspenetration in kleine Poren. Als Grundlage dient hierbei die Washburn-Gleichung [109], die sich aus den Betrachtungen der Druckverhältnisse in flüssigkeitsgefüllten Kapillaren ergibt.

Die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit ist die Folge der Kohäsionskräfte, die zwischen den Molekülen wirken. Die Oberflächenspannung ist definiert als Verhältnis der zur Vergrößerung der Oberfläche erforderlichen Arbeit zur Oberflächenänderung. Die Krümmung der Oberfläche führt dazu, dass sich im Inneren der Flüssigkeit ein Druck ausbildet. Ein kugelförmiger Tropfen einer Flüssigkeit mit der Oberflächenspannung σ vom Radius ρ steht daher gegenüber dem Umgebungsdruck p_0 unter einem Druck p , wobei gilt:

$$p - p_0 = \frac{2\sigma}{\rho} \quad (4-1).$$

In einer Kapillare bilden nicht vollständig benetzende Flüssigkeiten mit der Kapillarwand einen Kontaktwinkel θ aus. Unter der Annahme, dass sich in der Kapillare mit dem Radius r ein halbkugelförmiger Meniskus mit dem Radius ρ ausformt, folgt:

$$p - p_0 = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (4-2).$$

Quecksilber ist eine nicht benetzende Flüssigkeit, d. h. der Kontaktwinkel beträgt mehr als 90° ($\theta > \pi/2$). Dies hat einen negativen Kapillardruck zur Folge, sodass in einem Kapillarsystem Quecksilber im Gegensatz z. B. zu Wasser nicht in die Kapillare hineingezogen, sondern aus der Kapillare herausgedrängt wird. Das wiederum bedeutet, dass ein äußerer Druck aufgebracht werden muss, um die Kapillaren mit Quecksilber zu füllen, der mit abnehmendem Kapillardurchmesser zunimmt. Für den Zusammenhang zwischen Porenradius und aufzubringendem Druck folgt daher:

$$r = - \frac{2\sigma \cos \theta}{\Delta p} \quad (4-3)$$

Wegen der nicht ideal halbkugelförmigen Form des Meniskus, der sich auf einer Flüssigkeitssäule in einer Kapillare ausbildet, ist dieser Zusammenhang mathematisch nicht völlig korrekt, wird aber allgemein zur Berechnung eingesetzt. Eine weitere Einschränkung liegt in der dieser Überlegung zugrunde liegenden Annahme zylindrischer Poren. In realen Medien sind die Poren im Allgemeinen nicht ausschließlich zylindrisch, sondern weisen eine Vielfalt geometrischer Formen auf. Rootare et al. [110] konnten jedoch zeigen, dass sowohl die Annahme zylindrischer Poren als auch die Messung der Arbeit, die das Eintauchen eines porösen Körpers in Quecksilber erfordert, bei der Berechnung der Porengrößenverteilung zum gleichen Ergebnis führt. Die Verwendung von (4-3) liefert demnach bei der Ermittlung der Porengröße hinreichend genaue Resultate.

4.3 Durchführung der Messung

Sämtliche Messungen erfolgten mit einem Quecksilber-Posimeter des Typs Autopore IV 9500 der Fa. Micromeritics. Die Proben hatten eine Größe von etwa 25 mm × 120 mm. Die einzusetzende Menge richtete sich nach dem Verdichtungsgrad der jeweiligen Probe. Je höher die Verdichtung, also je geringer der Hohlraumanteil in der Probe war, umso mehr Material wurde benötigt. Für die Untersuchungen wurden die Proben in kleinere Stücke geschnitten und in die Probenkammer des Penetrometers gegeben, welches zum einen die Probe aufnimmt und zum anderen als Quecksilberreservoir für die Messung fungiert.

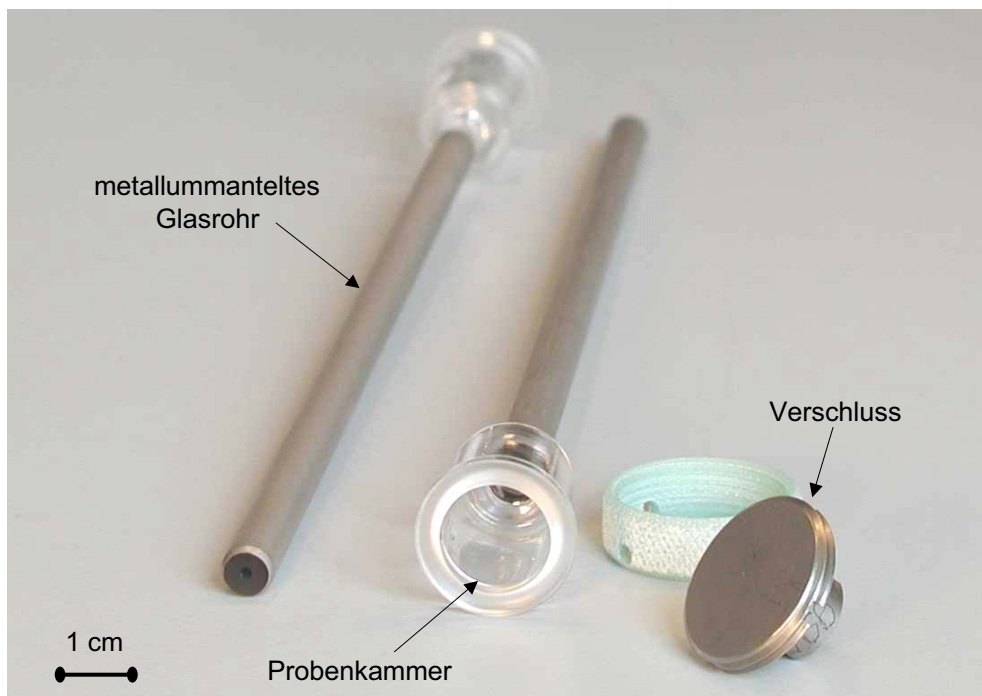


Abb. 4-1: Penetrometer

Nach dem Verschließen des Penetrometers und dem Einführen in das Porosimeter werden das Probengefäß und das zuführende Glasrohr zunächst evakuiert und mit Quecksilber gefüllt. Anschließend erfolgt eine schrittweise Erhöhung des Drucks, der auf die Quecksilbersäule ausgeübt wird. Mit zunehmendem Druck werden dabei Poren immer geringerer Größe gefüllt. Die Quecksilbersäule im Glasrohr fungiert dabei zum einen als Quecksilberreservoir und zum anderen in Verbindung mit der Metallummantelung des Glasrohrs als koaxialer Kondensator. Der Meniskus der Quecksilbersäule wandert mit steigendem Druck immer weiter in Richtung der Probenkammer, wodurch sich die Kapazität des Kondensators stetig ändert. Aus dem gemessenen Wert der Kapazität lassen sich das intrudierte Flüssigkeitsvolumen und in Verbindung mit dem gerade anliegenden Druck mit Hilfe von (4-3) die Größe der momentan gefüllten Poren ermitteln.

4.4 Ergebnisdarstellung der Porengrößenanalyse

Die aufgenommenen Daten können in unterschiedlicher Weise visualisiert werden. Als Beispiel zeigen **Abb. 4-2** und **Abb. 4-3** die Ergebnisse eines ungestrichenen sowie eines gestrichenen Papiers. Die in **Abb. 4-2** dargestellten Verteilungskurven repräsentieren die Häufigkeitsdichte, mit der die Poren des jeweiligen Durchmessers auftreten. Die Häufigkeitsdichte berechnet sich dabei als erste Ableitung des kumulativen Intrusionsvolumens

nach der Porengröße. Je nach Porengrößenverteilung erreicht das kumulative spezifische Intrusionsvolumen unterschiedliche Maximalwerte, wie in Abb. 4-3 zu erkennen ist. Die Darstellung erfolgt hier aufgrund der nicht normierten Skalierung der Ordinate dimensionsbehaftet. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde darüber hinaus wie auch in Abb. 4-2 auf eine Korrektur der Kurvenverläufe, welche wegen der logarithmischen Skalierung der Abszisse erforderlich wäre, verzichtet.

Die Porengrößenverteilung des ungestrichenen Papiers in Abb. 4-2 weist eine monomodale Funktion mit einem Maximum bei etwa 2.500 nm auf, während das gestrichene Papier eine bimodale Funktion mit einem zweiten Peak bei etwa 100 nm erkennen lässt [104/111]. Dies ist auf die Strichschicht zurückzuführen, die an der Paperoberfläche eine zusätzliche Schicht mit deutlich kleineren Poren ausbildet. Da diese Schicht sehr viel dünner ist als das Rohpapier und damit ein geringeres Hohlraumvolumen aufweist, ergibt sich für die kleineren Poren auch eine merklich geringere Häufigkeit.

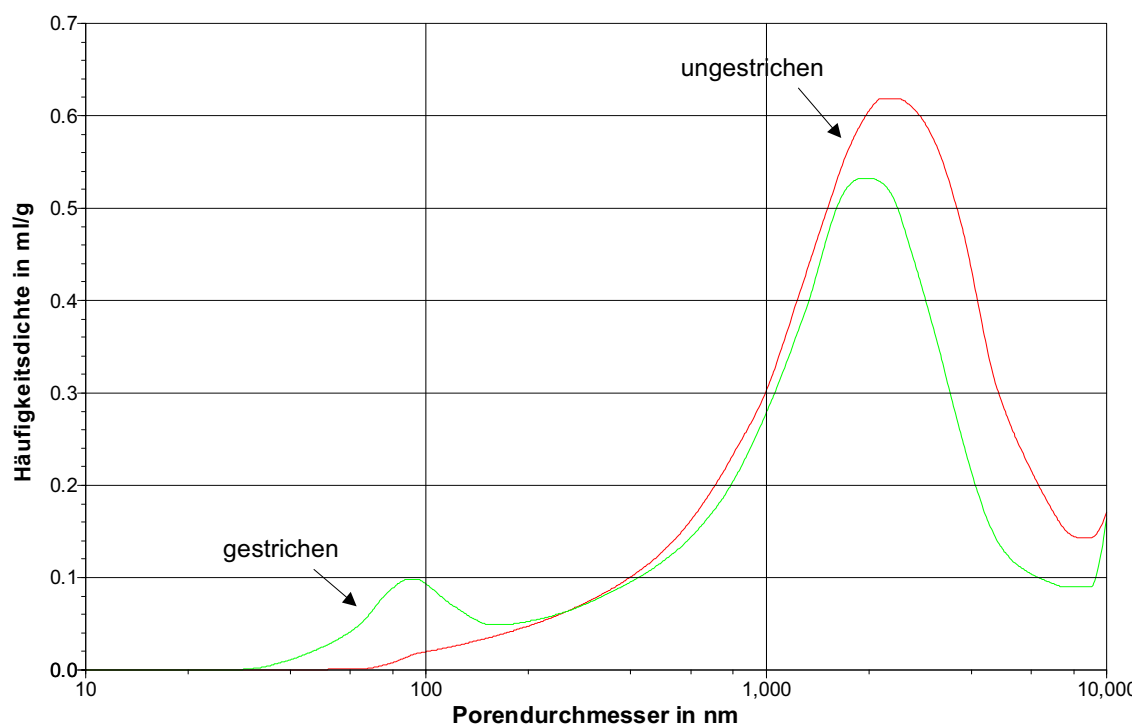


Abb. 4-2: Porengrößenverteilung eines ungestrichenen und eines gestrichenen Papiers

Betrachtet man nicht die Häufigkeiten, sondern die Oberfläche, welche die Poren aufweisen, dann zeigt sich, dass kleine Poren sehr viel stärker ins Gewicht fallen als große. Das wird anhand der Abb. 4-3 deutlich, in der die kumulative massenbezogene Porenoberfläche

aufgetragen ist. Gut zu erkennen ist der große Anteil, den die Poren der Strichschicht mit einem Durchmesser bis zu 100 nm an der gesamten Porenoberfläche haben. Trotz der geringen Häufigkeit tragen die Poren der Strichschicht etwa die Hälfte zur gesamten Porenoberfläche des gestrichenen Papiers bei.

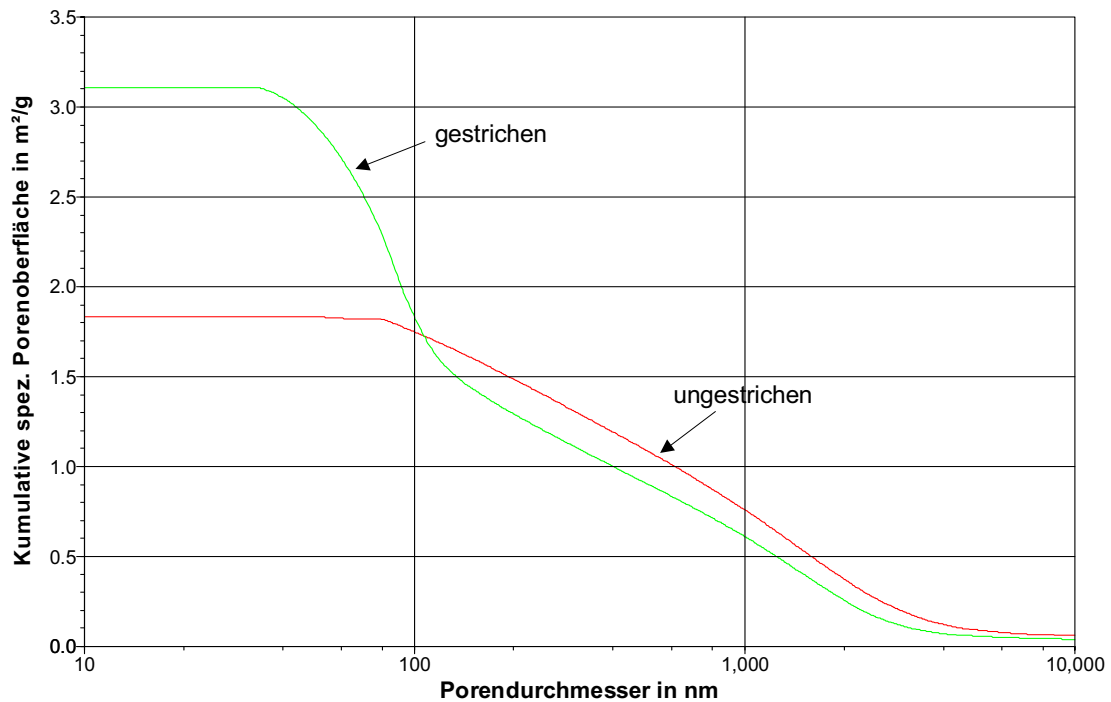


Abb. 4-3: Kumulative spezifische Porenoberfläche eines ungestrichenen und eines gestrichenen Papiers

Neben der Häufigkeit und der Porenoberfläche kann auch das Porenvolumen als Variable, die aus den Rohdaten berechnet wird, dargestellt werden. Aufgrund der Vielzahl der aufgenommenen Messpunkte lassen sich Porenoberfläche und Porenvolumen nicht nur kumulativ, sondern auch inkrementell mit hinreichend hoher Auflösung darstellen. Ferner besteht die Möglichkeit, alternativ zum Porendurchmesser den anliegenden Druck auf der Abszisse abzubilden. Die größte Aussagekraft hinsichtlich der Porenstruktur bieten jedoch die in Abb. 4-2 und Abb. 4-3 gezeigten Diagrammtypen, daher wird im Folgenden bevorzugt auf diese Form der Darstellung zurückgegriffen.

5 Optische Eigenschaften von Streichfarben

5.1 Ziel des Streichens

Das Ziel eines Strichauftrags liegt zum einen in der Verbesserung der Bedruckbarkeit, zum anderen sollen die optischen Eigenschaften gezielt beeinflusst werden [112]. Letzteres wird durch die Fähigkeit der Strichschicht erreicht, Kontrastunterschiede der darunter liegenden Faserstoffschicht auszugleichen. Dieser Faktor ist besonders bei der Herstellung leichtgewichtiger, holzstoff- und altpapierhaltiger gestrichener Druckpapiere von Bedeutung. Bei diesen Papieren werden über die Holzstoff- und Altpapierkomponenten unerwünschte Objekte wie dunkle Fasern oder Schmutzpunkte eingetragen, die im Allgemeinen eine deutlich geringere Helligkeit aufweisen als das Fasermaterial und dadurch eine Kontrasterhöhung im Rohpapier zur Folge haben. Dem anschließend aufgetragenen Strich fällt dann die Aufgabe zu, diese Kontrastunterschiede auszugleichen, damit das fertige Papier keinen unruhigen optischen Eindruck hinterlässt.

5.2 Untersuchtes Probenmaterial

Die Untersuchung der optischen Eigenschaften und der Porengrößenverteilung erfolgte an laborativ gestrichenen Proben. Geprüft wurden drei industriell aufbereitete LWC-Tiefdruck-Streichfarben sowie je drei Kaolin- und Calciumcarbonat-basierende Streichfarben, die im Labormaßstab hergestellt wurden.

Zwei der drei industriell erzeugten Streichfarben enthielten Kaolin als Basispigment, während die dritte Streichfarbe überwiegend aus Calciumcarbonat bestand. Alle Streichfarben enthielten ferner ca. 30 % Talkum.

Die Untersuchung industrieller und laborativer Streichfarben unterschiedlicher Zusammensetzung bot die Möglichkeit, neben dem Einfluss des Pigmenttyps auch die Auswirkungen von Streichfarben-Hilfsmitteln auf die Modellierbarkeit zu überprüfen.

Zur Herstellung der Laborstreichfarben wurden die Pigmentslurys mit identischen Mengen von 7,5 Massen-% (bezogen auf Pigmentmasse) des gleichen Bindemittels auf Basis von Styrol und Butadien vermischt und auf konstanten pH-Wert (pH 9) eingestellt. Ansonsten wurden keine weiteren Hilfsmittel zugegeben. Die erforderliche Verdünnung erfolgte mit destilliertem Wasser.

Zur Unterscheidung der verschiedenen Streichfarben werden im weiteren Verlauf folgende Zuordnungen verwendet:

- Praxisstreichfarbe K1: Kaolin-basierte industrielle Streichfarbe 1
- Praxisstreichfarbe K2: Kaolin-basierte industrielle Streichfarbe 2
- Praxisstreichfarbe C: Calciumcarbonat-basierte industrielle Streichfarbe
- Laborstreichfarbe C1: Calciumcarbonat-basierte laborativ erzeugte Streichfarbe 1
- Laborstreichfarbe C2: Calciumcarbonat-basierte laborativ erzeugte Streichfarbe 2
- Laborstreichfarbe C3: Calciumcarbonat-basierte laborativ erzeugte Streichfarbe 3
- Laborstreichfarbe K1: Kaolin-basierte laborativ erzeugte Streichfarbe 1
- Laborstreichfarbe K2: Kaolin-basierte laborativ erzeugte Streichfarbe 2
- Laborstreichfarbe K3: Kaolin-basierte laborativ erzeugte Streichfarbe 3

Untersucht wurden zum einen gestrichene Papiere und zum anderen gestrichene Folien, die isolierte Strichschichten simulieren sollten. Um Einflüsse des Trägermaterials weitgehend auszuschließen, wurden sämtliche gestrichenen Papiere mit identischem, industriell produziertem LWC-Rohpapier hergestellt.

Ein grundlegendes Problem bei der Betrachtung von Strichschichten liegt darin, dass Striche nicht isoliert, also ohne ein Trägermedium, erzeugt werden können. Vereinzelt finden sich in der Literatur zwar Hinweise zur Herstellung solcher Strichschichten, diese konnten jedoch nicht nachvollzogen werden. Daher wurden sämtliche Strichschichten auf eine handelsübliche Polyethylen-Kopierfolie der Fa. Xerox aufgetragen, die sich am ehesten als Basis für den Strichauftrag eignete. Der Brechungsindex der Folie liegt im sichtbaren Wellenlängenbereich zwischen 1,4 und 1,5 und damit recht nahe an den Werten der untersuchten Pigmente. Daher waren keine Verfälschungen der Resultate durch Streuvorgänge an der Grenzfläche zwischen Strichschicht und Folie zu erwarten. Um trotzdem Aussagen zu den isolierten Strichen treffen zu können, wurde, basierend auf den Messwerten der gestrichenen Folien, der Einfluss der Folie herausgerechnet. Dazu wurden zunächst die Werte für R_0 und R_∞ der gestrichenen sowie der ungestrichenen Folie ermittelt. Anschließend konnten mithilfe von (3-15) die entsprechenden Werte der reinen Streichfarbenschicht berechnet werden, indem die gestrichene Folie als Zweischichtsystem, bestehend aus Kopierfolie und darüber befindlicher Strichschicht, aufgefasst wurde. Die so ermittelten Werte

spiegeln damit allein die Eigenschaften der Strichschicht wider. Daher wird im Folgenden zwischen den gestrichenen Folien einerseits, deren Reflexionskurven mit nach oben gerichteter Strichschicht gemessen wurden, sowie den isolierten Strichen andererseits, die reine Rechengrößen darstellen, unterschieden.

5.3 Herstellung der gestrichenen Proben

5.3.1 Strichauftrag

Zum Streichen der Papiere und Folien wurde ein Rakelstreichgerät der Fa. Gockel verwendet, mit dem die Proben einzeln gestrichen wurden. Die Steuerung der Strichauftragsmenge erfolgte über die Auswahl des Rakelstabs und die Vorschubgeschwindigkeit sowie die Einstellung des Feststoffgehalts der Streichfarbe. Zu hohe Feststoffgehalte verursachten Rakelstreifen, sodass alle industriellen Streichfarben, die Feststoffgehalte um 60 % aufwiesen, mit destilliertem Wasser auf Feststoffgehalte von höchstens 40 % verdünnt werden mussten.

Die Trocknung der gestrichenen Papiere erfolgte in einem Fototrockner vom Typ Kindermann 460 U. Die gestrichene Seite lief dabei gegen einen rotierenden verchromten und beheizten Zylinder. Die Temperatur des Zylinders lag bei ca. 65 °C, die Trocknungszeit betrug etwa 12 Minuten. Die gestrichenen Folien ließen sich nicht ohne Beschädigung der Strichschicht im Fototrockner trocknen. Daher wurden sie in einem Trockenschrank bei ca. 105°C für 15 Minuten getrocknet.

5.3.2 Ermittlung des Strichgewichts

Um die flächenbezogene Masse des aufgetragenen Strichs zu ermitteln, wurden bei den gestrichenen Papieren aus den Probenblättern mit einer Probenstanze unmittelbar nach der Trocknung pro Blatt 5 runde Proben mit einer Fläche von jeweils 9,095 cm² ausgestanzt und ausgewogen. Nach Abzug der flächenbezogenen Masse des Rohpapiers, die auf die gleiche Weise ebenfalls nach Durchlaufen des Fototrockners ermittelt wurde, ergab sich die flächenbezogene Masse des Strichs.

Bei den gestrichenen Folien gestaltete sich die Ermittlung des Strichgewichts komplizierter, da bereits die Trägerfolie große Schwankungen in der flächenbezogenen Masse zeigte. In **Abb. 5-1** ist dieser Sachverhalt anhand der Verteilung der flächenbezogenen Masse der für die Bestimmung des Strichgewichts verwendeten Folien sichtbar

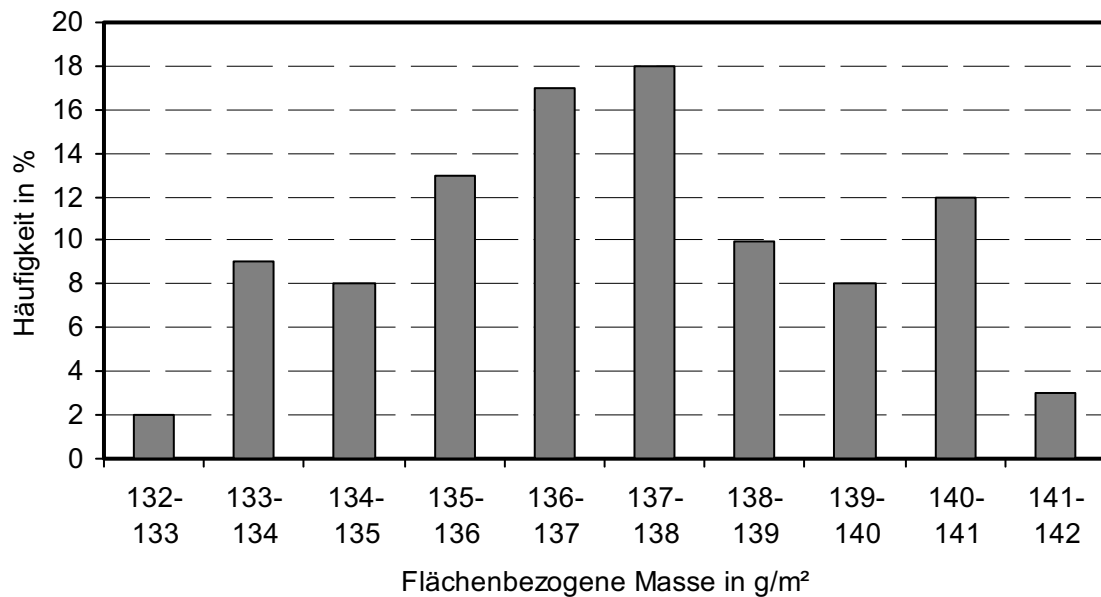


Abb. 5-1: Verteilung der flächenbezogenen Masse der Kopierfolien

Die große Streuung der flächenbezogenen Masse der Kopierfolien machte es erforderlich, von jeder Folie, die für die Bestimmung der flächenbezogenen Masse der aufgetragenen Strichschicht vorgesehen war, vor dem Streichen die flächenbezogene Masse zu ermitteln. Dazu wurden von diesen Folien Randstreifen abgeschnitten und von diesen wie oben beschrieben durch das Ausstanzen und Auswiegen von 5 Proben die flächenbezogene Masse bestimmt. Eine vorherige Trocknung analog zum Streichrohpaper war dagegen nicht erforderlich, da die Folien keine messbare Feuchtigkeit enthielten. Durch eine Nummerierung der auf diese Weise vermessenen Folie war später eine Zuordnung des korrekten Wertes sichergestellt. Nach dem Streichen und Trocknen der Folien erfolgte an diesen Proben die oben beschriebene gravimetrische Bestimmung der flächenbezogenen Masse

5.4 Partikelgrößenverteilung der Pigmente

Die Pigmentslurrys für die Laborstreichfarben wurden mit einem Partikelgrößenmessgerät des Typs Coulter LS 120 untersucht. Das Messprinzip dieses Geräts beruht auf der in Abhängigkeit von der Teilchengröße unterschiedlich starken Beugung von Laserlicht, die zur Größenklassifizierung der Teilchen verwendet wird. In **Abb. 5-2** sind die Resultate für die Calciumcarbonat-Slurrys dargestellt, während **Abb. 5-3** die entsprechenden Befunde der Kaolin-Slurrys zeigt. Jeder Kurvenzug stellt den Mittelwert aus jeweils 6 Einzelmessungen dar.

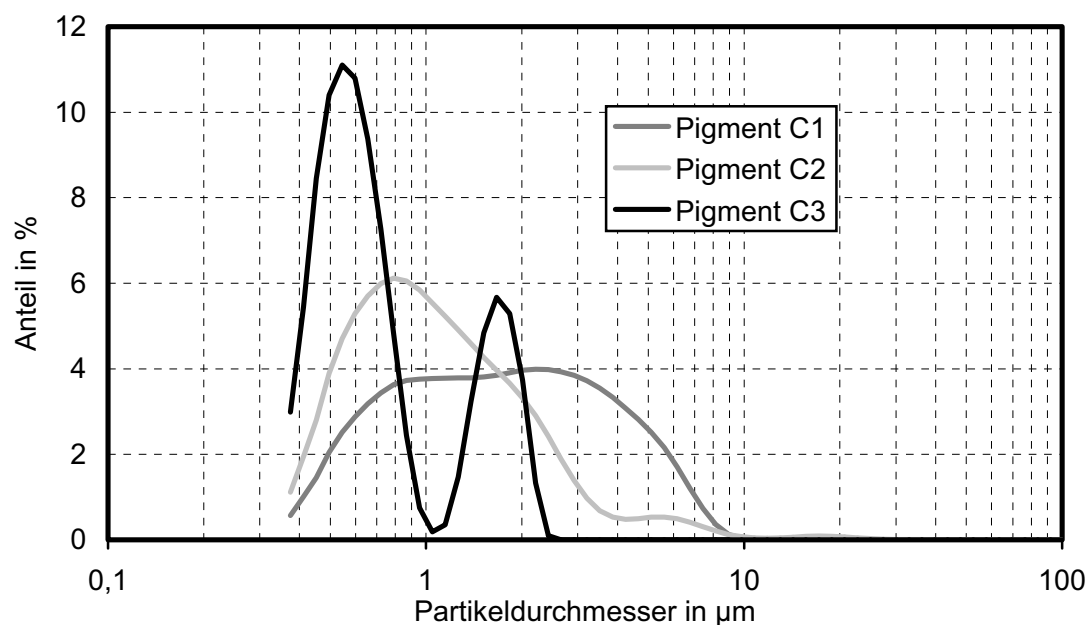


Abb. 5-2: Partikelgrößenverteilung der Calciumcarbonat-Slurrys

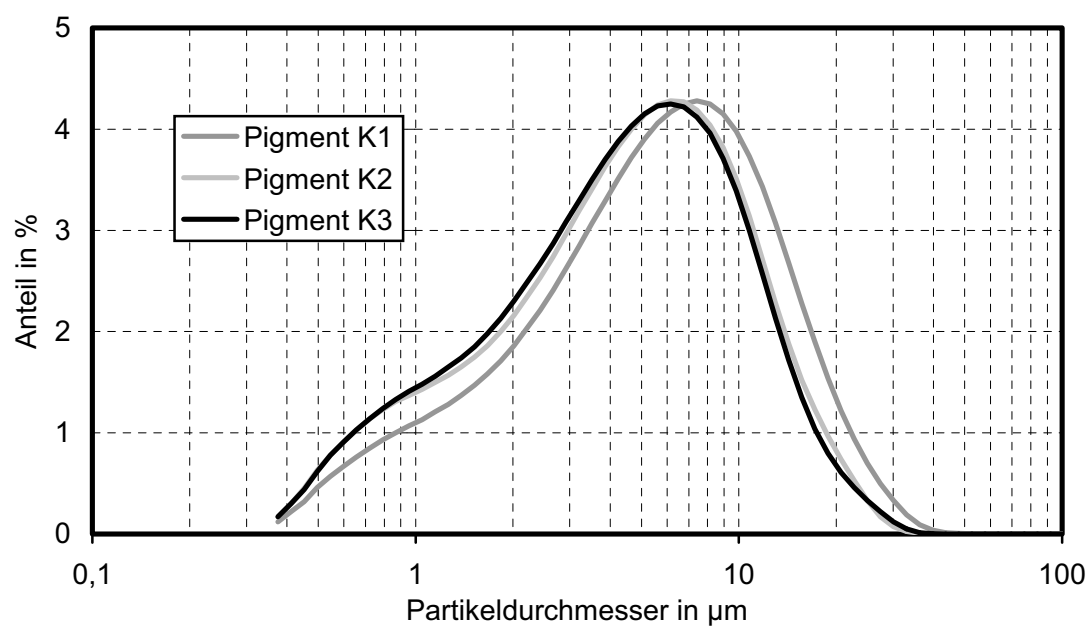


Abb. 5-3: Partikelgrößenverteilung der Kaolin-Slurrys

Nach Angaben des Herstellers weisen die Calciumcarbonate folgende Eigenschaften auf:

- Pigment C1: 60 Massen-% $< 2 \mu\text{m}$; Dichte: 1965 kg/m^3 .
- Pigment C2: 75 Massen-% $< 1 \mu\text{m}$; Dichte: 1829 kg/m^3 .
- Pigment C3: 95 Massen-% $< 2 \mu\text{m}$; Dichte: 1965 kg/m^3 .

Die Unterschiede werden anhand der Größenverteilung sichtbar. Während die Partikel des Pigments C1 eine relativ breite Verteilung aufweisen, zeigt Pigment C2 ein deutliches Maximum bei etwa 0,8 μm und einen geringen Anteil größerer Teilchen. Pigment C3 schließlich weist eine bimodale Verteilung mit ausgeprägten Peaks bei etwa 0,6 μm sowie 1,8 μm auf. Das lässt darauf schließen, dass bei diesem Pigmenttyp gezielt zwei Pigmente mit enger Teilchengrößenverteilung gemischt wurden, um in der Mischung die gewünschten Eigenschaften zu erhalten.

Im Gegensatz zu den Calciumcarbonaten sind bei der Größenverteilung der Kaoline nur geringe Unterschiede zu erkennen. Nach Herstellerangaben sind diese wie folgt charakterisiert:

- Pigment K1: 60 Massen-% < 2 μm ; Dichte: 1585 kg/m^3 .
- Pigment K2: 76 Massen-% < 2 μm ; 60 Massen-% < 1 μm ; 15 Massen-% < 0,2 μm ; Dichte: 1601 kg/m^3 .
- Pigment K3: 70 Massen-% < 2 μm ; 48 Massen-% < 1 μm ; 12 Massen-% < 0,2 μm ; Dichte: 1601 kg/m^3 .

Die Pigmente K2 und K3 unterscheiden sich somit nur geringfügig, und auch Pigment K1 weist eine Partikelgrößenverteilung auf, die nur wenig in Richtung größerer Teilchen verschoben ist.

Vergleicht man die Partikelgrößen der Calciumcarbonate und der Kaoline miteinander, so fällt der erheblich größere Wert für die Kaoline auf. Dieser Sachverhalt ist zum überwiegenden Teil auf die Mess- und Auswerteprozedur zurückzuführen, die der Funktionsweise des eingesetzten Messgerätes zugrunde liegt. Für die Auswertung der Messdaten, die auf der Beugung von Laserlicht beruht, wird eine kugelförmige Gestalt der Partikel angenommen. Während diese Annahme für Calciumcarbonat noch weitgehend zutrifft, sind für Kaolin deutliche Abweichungen zu vermuten, da diese Pigmente eine eher plättchenförmige Struktur aufweisen. In diesem Zusammenhang ist für die Kaoline das Verhältnis von Durchmesser zu Dicke („aspect ratio“) ein wichtiger Parameter. Handelsübliche Streichpigmente weisen je nach Herkunft und Grad der mechanischen Bearbeitung ein Verhältnis zwischen etwa 10 und 50 auf, sodass diese Teilchen eher einer Scheibe als einer Kugel

ähneln. Eine direkte Vergleichbarkeit der mit dem Coulter-Messgerät ermittelten Partikelgrößen der Calciumcarbonate und Kaoline ist daher nicht zweckmäßig, jedoch kann die Betrachtung innerhalb der jeweiligen Pigmentklasse die Unterschiede der optischen Eigenschaften verdeutlichen.

5.5 Messung der optischen Eigenschaften

Zur Ermittlung der optischen Eigenschaften wurde ein Spektralfotometer des Typs Elrepho 2000 der Fa. Datacolor eingesetzt. Bei sämtlichen Messungen wurde der UV-Anteil der Beleuchtungsquelle durch das vollständige Einschwenken des UV-Sperrfilters (Kantenfilter 395 nm) in den Strahlengang weitestgehend herausgefiltert. Auf diese Weise sollte der Einfluss von eventuell vorhandenem optischem Aufheller auf ein Minimum reduziert werden. Die Kopierfolie wurde darüber hinaus in einem Spektralfotometer des Typs CS 5 der Fa. Datacolor vermessen, da dieses Gerät auch die Messung der Transmission ermöglicht. So ließen sich die optischen Eigenschaften der transparenten Folie bestimmen.

Erfasst wurden die Werte für R_0 und R_∞ , die als Basis der weiteren Berechnungen dienten. R_0 wurde durch die Messung einer einzelnen Probe (gestrichenes Papier bzw. gestrichene Folie) über einem schwarzen Hohlkörper, R_∞ durch eine Stapelmessung ermittelt. Um die R_∞ -Werte der Streichfarben zu bestimmen, wurde durch das Auftragen einer ausreichend großen Menge Streichfarbe mittels einer Pipette auf einen Glas-Objektträger eine opake Schicht erzeugt, die dann mit dem Elrepho optisch vermessen wurde. Vergleichsmessungen mit gestrichenen Folien, die einen Strichauftrag von etwa 60 g/m² aufwiesen, zeigten nahezu deckungsgleiche Reflexionskurven.

Ferner ließen Vergleiche zwischen ein- und beidseitig gestrichenen Folien mit gleicher insgesamt applizierter flächenbezogener Masse des Strichs erkennen, dass die beidseitig gestrichenen Folien höhere Lichtabsorptionskoeffizienten aufwiesen, während die Lichtstreuoeffizienten sich nicht signifikant von denen der einseitig gestrichenen Folien unterschieden. Die Ursache liegt im Absorptionsvermögen der Folie, das bei zweiseitiger Beschichtung stärker zum Tragen kommt und den Wert des Absorptionskoeffizienten messbar erhöht [113]. Das Streuvermögen der Folie ist dagegen im Vergleich zur Strichschicht vernachlässigbar. Daher beziehen sich alle folgenden Betrachtungen der optischen Eigenschaften auf einseitig gestrichene Folien.

5.6 Reflexionskurven der untersuchten Streichfarben

In **Abb. 5-4** sind exemplarisch für die Praxisstreichfarbe K2 sowie die Laborstreichfarben C3 und K3 die Reflexionskurven von R_0 der niedrigsten untersuchten flächenbezogenen Masse sowie von R_∞ dargestellt.

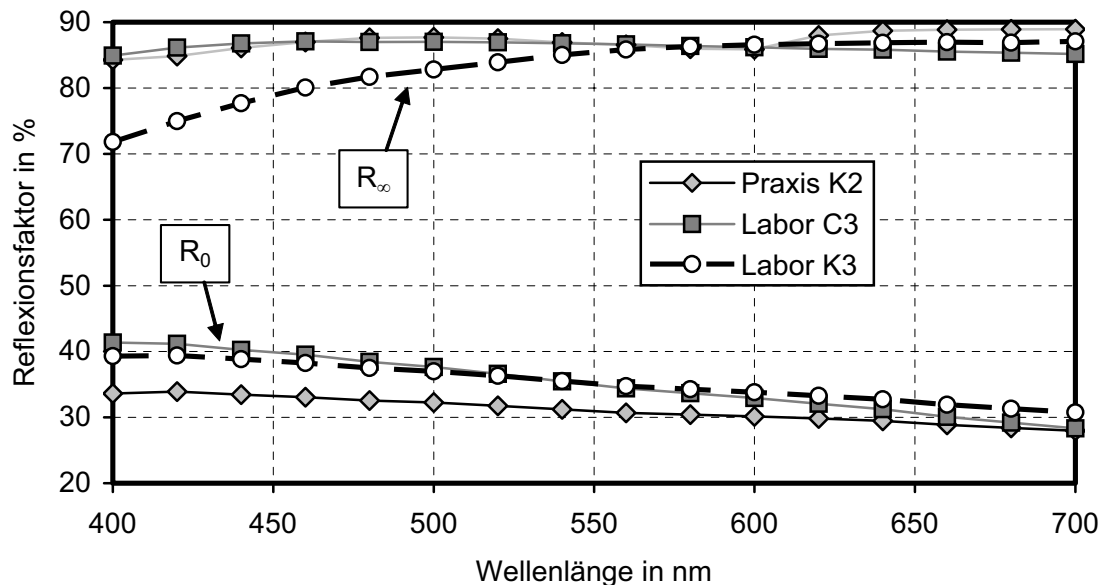


Abb. 5-4: Spektraler Verlauf der Reflexionsfaktoren R_∞ und R_0 für die Praxisstreichfarbe K2 (Strichgewicht für R_0 : 2,5 g/m²) und die Laborstreichfarben C3 und K3 (Strichgewicht für R_0 : 3,4 g/m²)

Auffällig ist der Abfall der Reflexionskurven von R_0 vom blauen zum roten Ende des Spektrums, während die spektralen Werte von R_∞ annähernd konstant bleiben. Die Ursache hierfür liegt im Porensystem, das sich in den Strichschichten ausbildet. Es weist einen erheblichen Anteil kleiner und kleinster Poren auf, deren Durchmesser geringer als die Wellenlänge des sichtbaren Lichts sind. Daher kommt, wie in Kap. 2.3 beschrieben, neben der optischen Streuung auch die Mie-Streuung zum Tragen. Unter Berücksichtigung von Porendurchmessers und Brechzahl der Strichschicht lässt sich ermitteln, dass das kürzerwellige blaue Licht eine stärkere Streuung erfährt als rotes Licht. Insbesondere bei sehr dünnen Strichschichten führt dies dazu, dass aufgrund der geringeren Zahl von Streuprozessen vom roten Anteil des eingestrahlteten Lichts verglichen mit dem blauen Anteil ein größerer Betrag am unteren Ende der Strichschicht austritt. Als Folge ergibt sich der beobachtete Verlauf des Reflexionsfaktors R_0 . Bei zunehmender Schichtdicke führt der erhöhte Anteil

an Mehrfachstreuung innerhalb der Strichschicht zu einer Nivellierung der spektralen Streuung, sodass der Eigenreflexionsfaktor R_∞ schließlich einen nahezu ausgeglichenen Verlauf über den sichtbaren Wellenlängenbereich zeigt.

Die Praxisstreichfarbe K2 lässt im Verlauf von R_∞ einen Abfall der Reflexionskurve bei etwa 600 nm erkennen. Ein solcher Verlauf ist charakteristisch für die Zugabe eines blau-violetten Nuancierfarbstoffs [114], der den Farbton der Streichfarbe ins Bläuliche verschieben soll. Die Laborstreichfarbe K3 dagegen zeigt das für Streichfarben auf Kaolin-Basis typische geringere Reflexionsvermögen im blauen Spektralbereich, worauf die zu-meist gelbliche Färbung der Kaoline zurückzuführen ist.

5.7 Farborte der untersuchten Streichfarben

Abb. 5-5 gibt die Farborte der untersuchten Streichfarben im CIEL*a*b*-Farbraum wieder. Während die Laborstreichfarben jeweils dicht beieinander liegen, spiegeln sich in der Position der Praxisstreichfarben die Auswirkungen der zugefügten Hilfsstoffe wider.

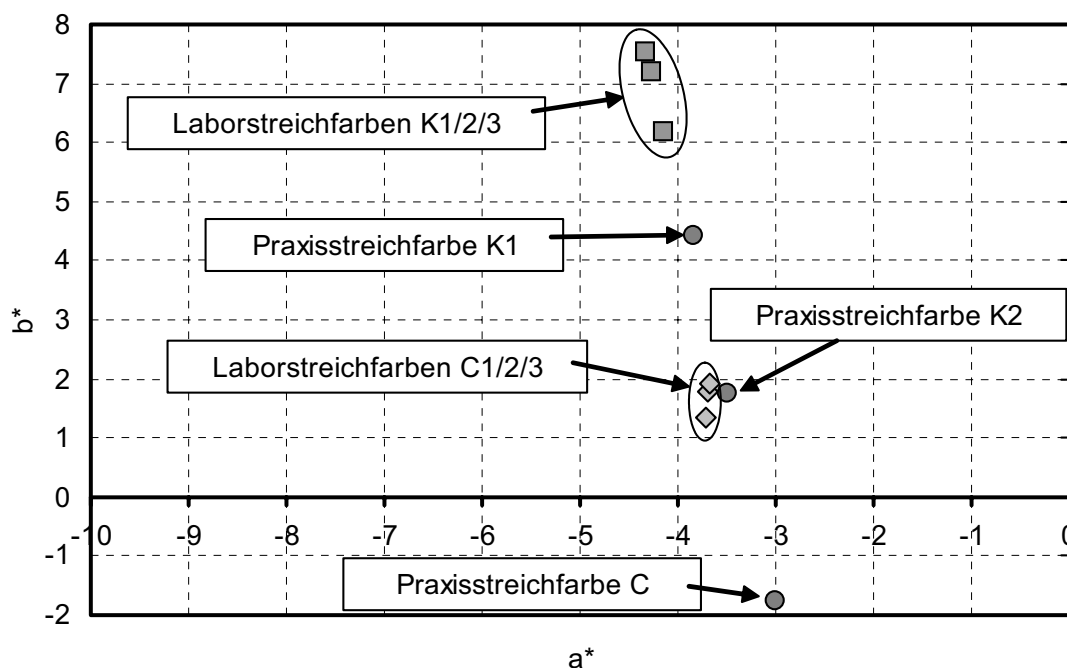


Abb. 5-5: Farborte der untersuchten Streichfarben im CIEL*a*b*-Farbraum

Durch die Farbstoffzugabe sind die Praxisstreichfarben K2 und C auf der b^* -Achse im Vergleich zur Praxisstreichfarbe K1 in Richtung kleinerer Werte, also Richtung Neutral-

weiß, verschoben. Streichfarbe C liegt auf Grund des zugegebenen optischen Aufhellers sogar im Bereich negativer b^* -Werte. Die Kaolin-basierenden Laborstreichfarben markieren dagegen mit b^* -Werten zwischen 6 und 8 das andere, gelbliche Ende der Farbskala.

5.8 Abdeckleistung von Streichfarben

5.8.1 Definition der Abdeckleistung

Die Fähigkeit einer Strichschicht zum Ausgleichen von Kontrastunterschieden wird auch als Abdeckleistung bezeichnet. Grundlage zur Ermittlung der Abdeckleistung einer Strichschicht ist der Reflexionsfaktor R_0 . Trägt man diesen über der flächenbezogenen Masse des Strichs auf, ergibt sich ein mit zunehmendem Auftragsgewicht abflachender Kurvenverlauf. **Abb. 5-6** zeigt exemplarisch die Resultate der Praxisstreichfarbe K2, die an gestrichenen Folien gemessen und auf isolierte Strichschichten umgerechnet wurden.



Abb. 5-6: R_0 als Funktion der flächenbezogenen Masse des Strichauftrags der Praxisstreichfarbe K2

Bei hohen Strichauftragsgewichten strebt der Wert von R_0 einem Grenzwert entgegen. Um den Mechanismus, welcher dem in Abb. 5-6 gezeigten Kurvenverlauf zugrunde liegt, mathematisch zu beschreiben, haben Paetow und Ohrnberger ein Modell vorgeschlagen [115], das kurz skizziert werden soll.

5.8.2 Modell der Abdeckleistung von Paetow und Ohrnberger

5.8.2.1 Herleitung des linearisierten Gleichungssystems

Ausgehend vom nichtlinearen Zusammenhang zwischen R_0 und der flächenbezogenen Masse des Strichs erfolgt, wie in **Abb. 5-7** zu sehen ist, zunächst eine Linearisierung, indem auf der Ordinate statt des Reflexionsfaktors R_0 der Quotient aus der flächenbezogenen Masse des Strichs und R_0 aufgetragen wird.

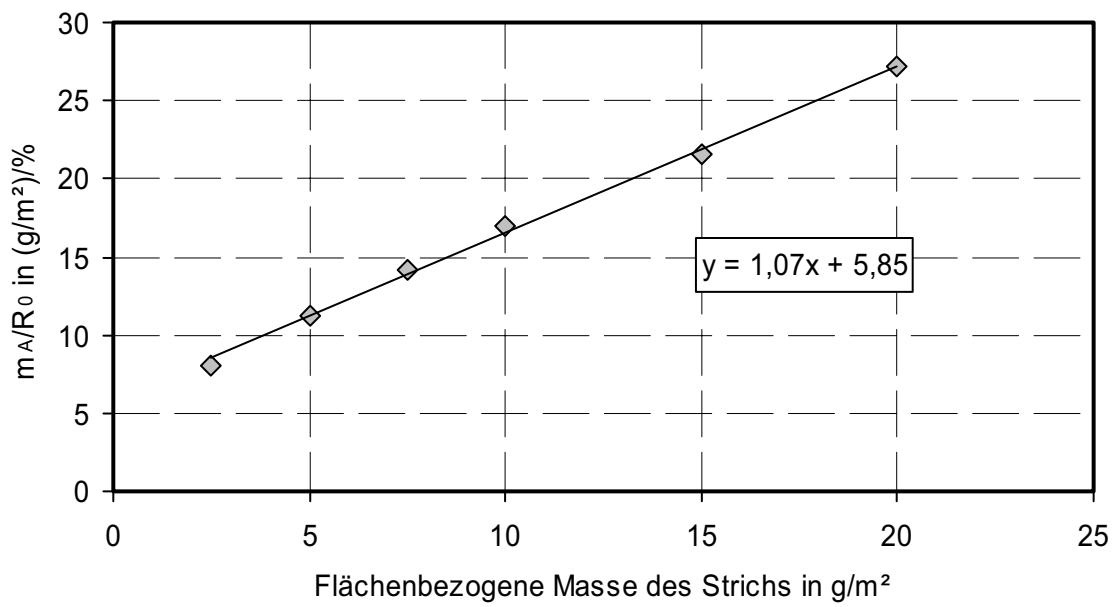


Abb. 5-7: Quotient m_A/R_0 als Funktion der flächenbezogenen Masse des Strichauftrags der Praxisstreichfarbe K2 mit eingezeichneter Ausgleichsgerade

Die eingezeichnete Ausgleichsgerade lässt sich durch folgende Gleichung beschreiben:

$$\frac{m_A(\text{Strich})}{R_0} = \frac{1}{R_{\text{ini}}} + \frac{1}{R_{\infty}} \cdot m_A(\text{Strich}) \quad (5-1)$$

Als Steigung der Geraden wurde der Kehrwert des Eigenreflexionsfaktors R_{∞} der Streichfarbe angesetzt. Das Maß der vertikalen Verschiebung der Gerade aus dem Ursprung repräsentiert den Kehrwert des initialen Reflexionsfaktors R_{ini} . Löst man (5-1) nach R_0 auf, ergibt sich:

$$R_0 = \frac{m_A(\text{Strich})}{\frac{1}{R_{\text{ini}}} + \frac{m_A(\text{Strich})}{R_{\infty}}} \quad (5-2)$$

oder auch:

$$R_0 = R_{ini} \frac{m_A(\text{Strich})}{1 + \frac{R_{ini}}{R_\infty} \cdot m_A(\text{Strich})} \quad (5-3)$$

Die grafische Darstellung von (5-3) zeigt **Abb. 5-8**. Dargestellt ist der Verlauf von R_0 in Abhängigkeit vom Strichauftragsgewicht, berechnet nach (5-3) für die Praxisstreichfarbe K2. Die Übereinstimmung zwischen Experiment und mathematischem Modell ist gut, wie die eingezeichneten Messpunkte zeigen.

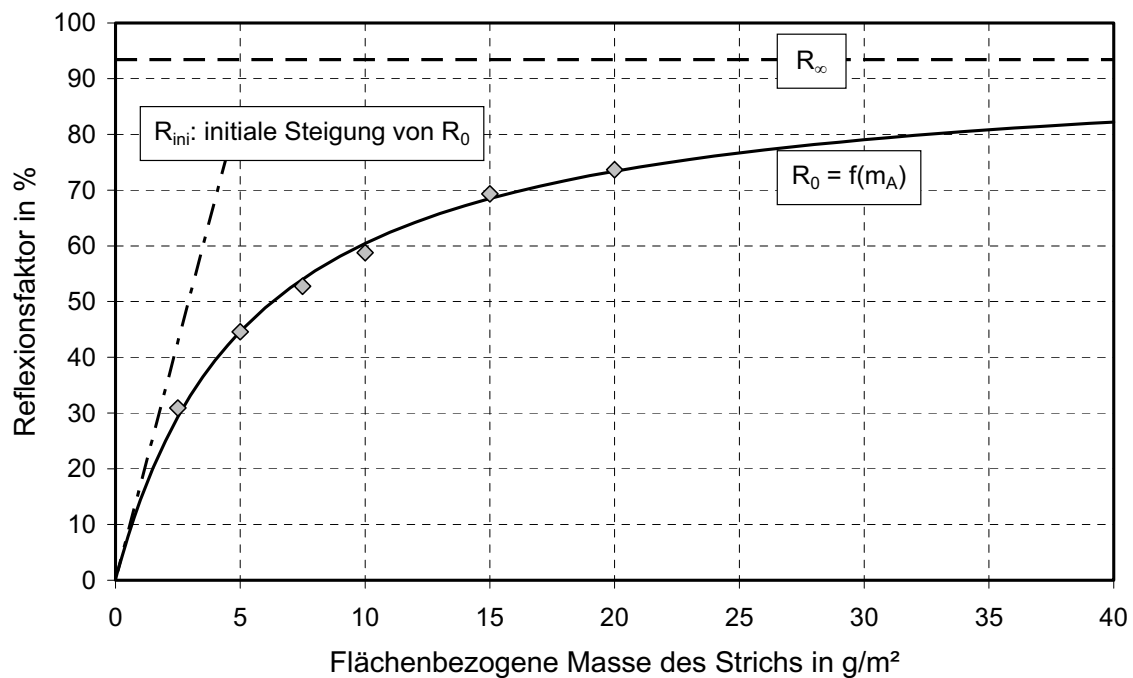


Abb. 5-8: Überlagerung von Modellrechnung und Experiment am Beispiel der Praxisstreichfarbe K2 ($R_{ini} = 0,171$; $R_\infty = 0,934$)

In der nichtlinearen Form von (5-3) zur Beschreibung des Verlaufs von R_0 sind zwei Koeffizienten enthalten. Der mit R_{ini} bezeichnete initiale Reflexionsfaktor gibt die initiale Steigung des Kurvenzugs im Nullpunkt an. Lässt man also die Streichfarbenschicht beliebig dünn werden, ergibt sich ein Reflexionsfaktor dieser infinitesimalen Schicht von R_{ini} . Der Wert von R_{ini} hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab. Maßgebend sind Typ und Grö-

ßenverteilung des Pigments, aber auch Art und Menge des Bindemittels sowie anderer chemischer Hilfsmittel haben einen gewissen Einfluss auf R_{ini} .

Der zweite Koeffizient, R_{∞} , stellt den Grenzwert dar, dem sich der Kurvenzug bei unendlich hohen Strichauftragsmassen asymptotisch annähert. Eine Grenzwertbetrachtung von (5-3) zeigt, dass R_0 für beliebig hohe Strichauftragsmassen tatsächlich gegen R_{∞} strebt:

$$\begin{aligned} \lim_{m_A \rightarrow \infty} R_{ini} \frac{m_A(\text{Strich})}{1 + \frac{R_{ini}}{R_{\infty}} \cdot m_A(\text{Strich})} &= \lim_{m_A \rightarrow \infty} \frac{m_A(\text{Strich})}{\frac{1}{R_{ini}} + \frac{m_A(\text{Strich})}{R_{\infty}}} = \\ &= \lim_{m_A \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{1}{m_A(\text{Strich}) \cdot R_{ini}} + \frac{1}{R_{\infty}}} = R_{\infty} \end{aligned} \quad (5-4)$$

Damit sind die beiden in (5-3) enthaltenen Koeffizienten physikalisch interpretierbar. Bei bekannten Werten von R_{ini} und R_{∞} lässt sich also für beliebige Strichauftragsgewichte der jeweilige Wert für R_0 berechnen, der als Maß für die Abdeckleistung interpretiert werden kann.

5.8.2.2 Spezifische Abdeckleistung

Ausgehend von (5-3) lässt sich nach Paetow und Ohrnberger die spezifische Abdeckleistung ermitteln, indem der Quotient aus R_0 und der flächenbezogenen Masse des Strichs gebildet wird:

$$\frac{R_0}{m_A(\text{Strich})} = R_{ini} \frac{1}{1 + \frac{R_{ini}}{R_{\infty}} \cdot m_A(\text{Strich})} \quad (5-5)$$

Abb. 5-9 zeigt den Verlauf der spezifischen Abdeckleistung für die Praxisstreichfarbe K2. Der Startpunkt für $m_A(\text{Strich}) = 0$ liegt bei R_{ini} , und die Kurve fällt für sehr hohe Strichauftragsgewichte bis auf Null, wie eine Grenzwertbetrachtung zeigt:

$$\lim_{m_A \rightarrow \infty} R_{ini} \frac{1}{1 + \frac{R_{ini}}{R_{\infty}} \cdot m_A(\text{Strich})} = \lim_{m_A \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{1}{R_{ini}} + \frac{m_A(\text{Strich})}{R_{\infty}}} = 0 \quad (5-6)$$

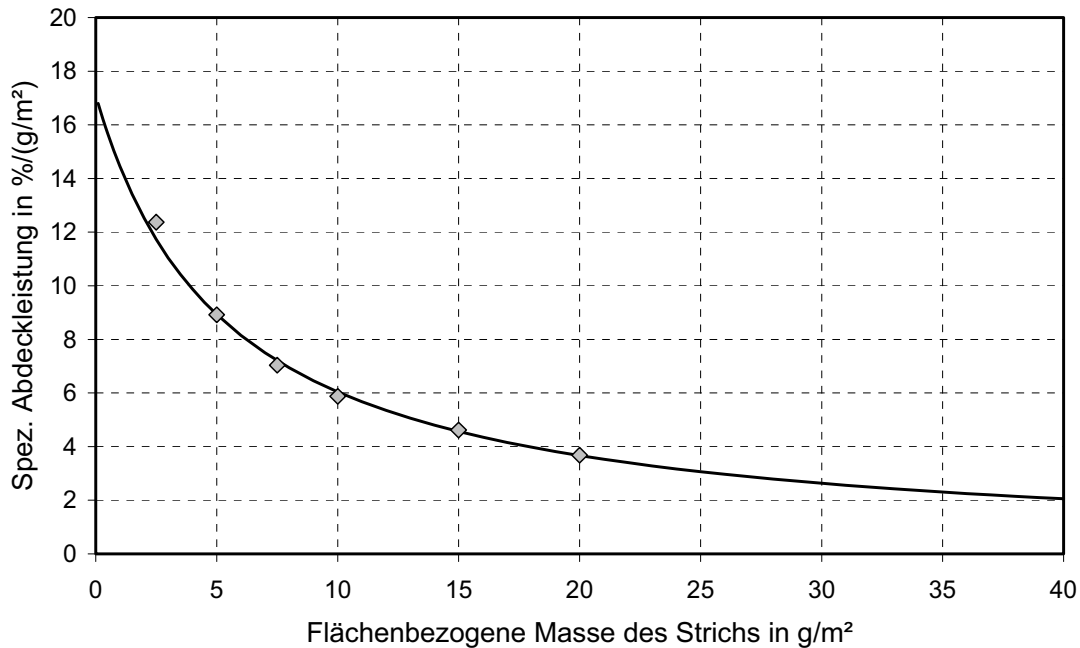


Abb. 5-9: Spezifische Abdeckleistung R_0/m_A der Praxisstreichfarbe K2 als Funktion der flächenbezogenen Masse des Strichauftrags

Paetow und Ohrnberger erklärten ebenso wie andere Autoren [116/117] diese Abnahme der spezifischen Abdeckleistung mit dem zunehmenden Auffüllen von Hohlräumen bei steigendem Strichgewicht. Dass diese Hypothese kaum haltbar ist, wird anhand einer porosimetrischen Betrachtung der Streichfarbschichten deutlich.

5.8.3 Porosimetrische Betrachtung der Strichschichten

In **Abb. 5-10** ist die Oberfläche, welche die Poren mit Durchmessern zwischen 100 und 600 nm aufweisen, in Abhängigkeit von der flächenbezogenen Masse der Strichschicht ausgewählter Streichfarben dargestellt. Die Beschränkung auf Porengrößen zwischen 100 und 600 nm ergibt sich aus der Tatsache, dass lediglich Poren dieser Größe effektiv zur Streuung von Licht im sichtbaren Wellenlängenbereich zwischen 400 und 700 nm beitragen können. Kleinere Poren streuen eher kurzwelliges ultraviolettes Licht, während analog größere Poren im längerwelligen Infrarotbereich wirksam werden.

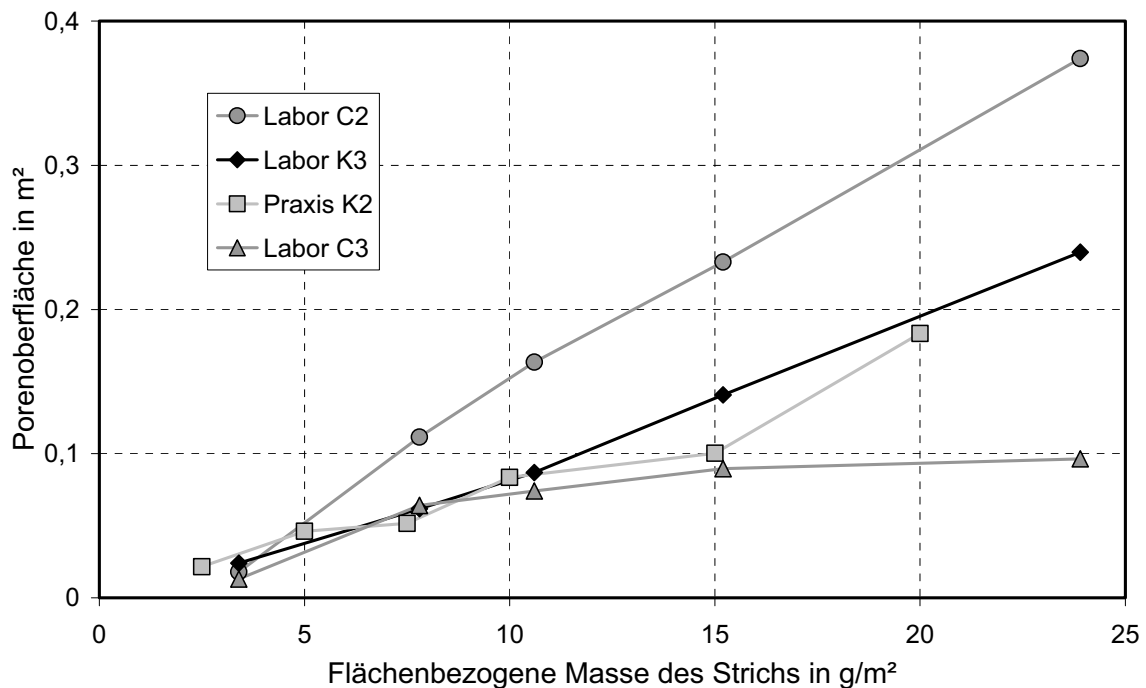


Abb. 5-10: Porenoberfläche der Poren mit Durchmessern zwischen 100 und 600 nm (ermittelt mittels Quecksilber- porosimetrie) als Funktion der flächenbezogenen Masse des Strichauftrags ausgewählter Streichfarben

Wäre die von verschiedenen Autoren [115/116/117] geäußerte Annahme, dass mit zunehmender Strichschichtdicke der Zuwachs an streuenden Grenzflächen abnimmt, korrekt, müssten sich Kurvenverläufe ergeben, die sich asymptotisch einem Grenzwert der Porenoberfläche nähern. Ein solcher Verlauf zeigt sich aber lediglich bei der Laborstreichfarbe C3, was sich vermutlich auf die geringe Teilchengröße der Pigmente zurückführen lässt. Alle anderen Streichfarben lassen einen annähernd linearen Zuwachs der Porenoberfläche mit steigendem Strichgewicht erkennen. Die Größenverteilung der Poren bleibt dabei qualitativ nahezu unverändert, wie **Abb. 5-11** und **Abb. 5-12** demonstrieren. In diesen Abbildungen sind beispielhaft die Porengrößenverteilungen der Praxisstreichfarbe K1 sowie der Laborstreichfarbe C2 dargestellt. Aufgetragen wurde die Häufigkeitsdichte über dem Porendurchmesser, sodass man eine halbquantitative Aussage über die Anzahl der Poren einer bestimmten Größe erhält. Man erkennt, dass das Maximum der Häufigkeit unabhängig von der Strichauftragsmasse annähernd dem gleichen Porendurchmesser zugeordnet werden kann und damit der rechnerisch ermittelbare mittlere Porendurchmesser nahezu konstant bleibt. Dieser mittlere Porendurchmesser ist wiederum charakteristisch für die jeweilige Streichfarbe und wird stark vom Pigmenttyp sowie der Partikelgröße beeinflusst. Da-

her weisen im Vergleich zur Praxisstreichfarbe K1 die aus der Laborstreichfarbe C2 gebildeten Strichschichten im Mittel geringere Porengrößen auf. Im Extremfall der Laborstreichfarbe C3 liegt das Häufigkeitsmaximum bei einer Porengröße von etwa 100 nm und damit am unteren Ende des für die Lichtstreuung effektiv wirksamen Bereichs. Als Folge zeigt diese Streichfarbe die geringsten Werte für das Lichtstreuvermögen.

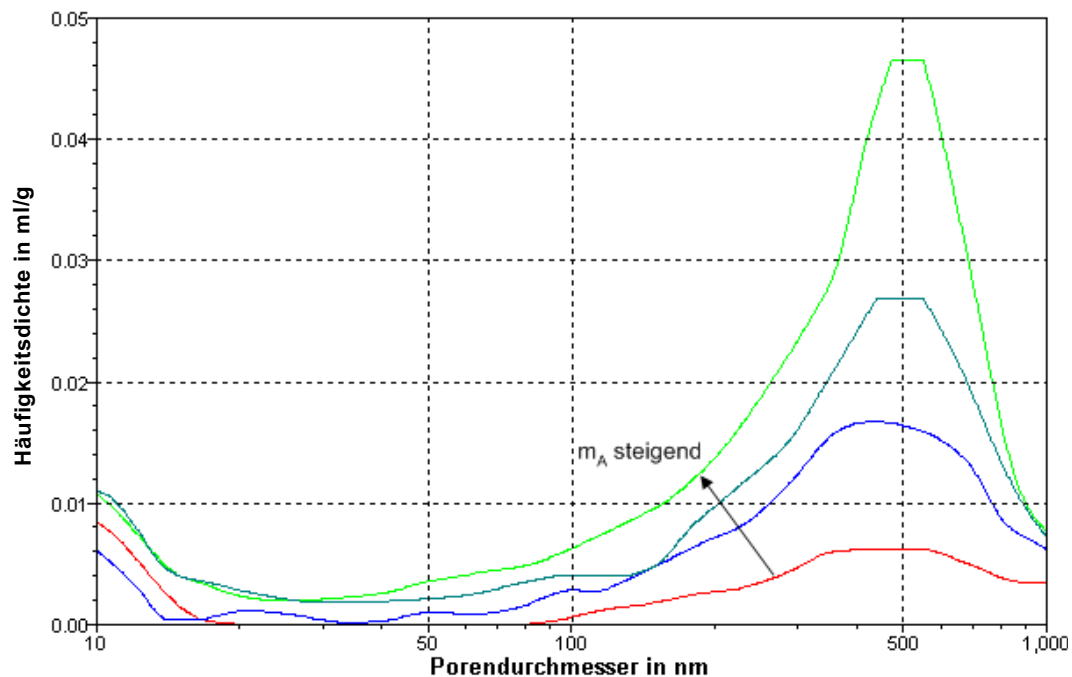


Abb. 5-11: Porengrößenverteilung der Praxisstreichfarbe K1 für verschiedene Strichauftragsmassen ($m_A = 2,5 / 5 / 7,5 / 10 \text{ g/m}^2$)

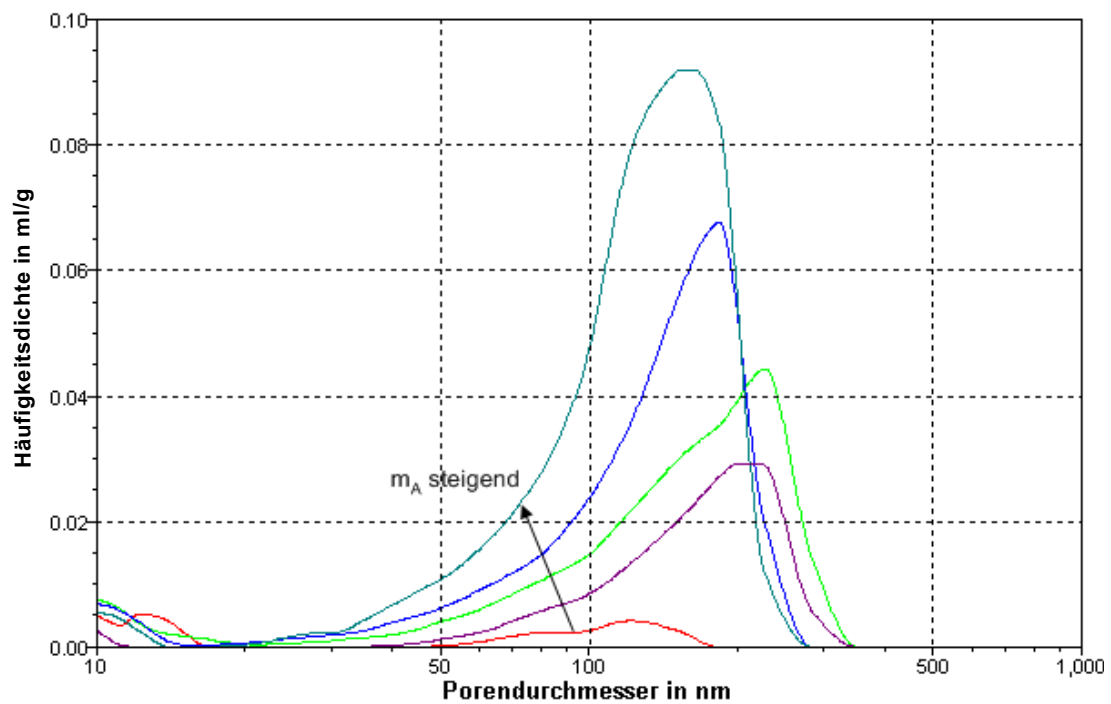


Abb. 5-12: Porengrößenverteilung der Laborstreichfarbe C2 für verschiedene Strichauftragsmassen ($m_A = 3,4 / 7,8 / 10,6 / 15,2 / 23,9 \text{ g/m}^2$)

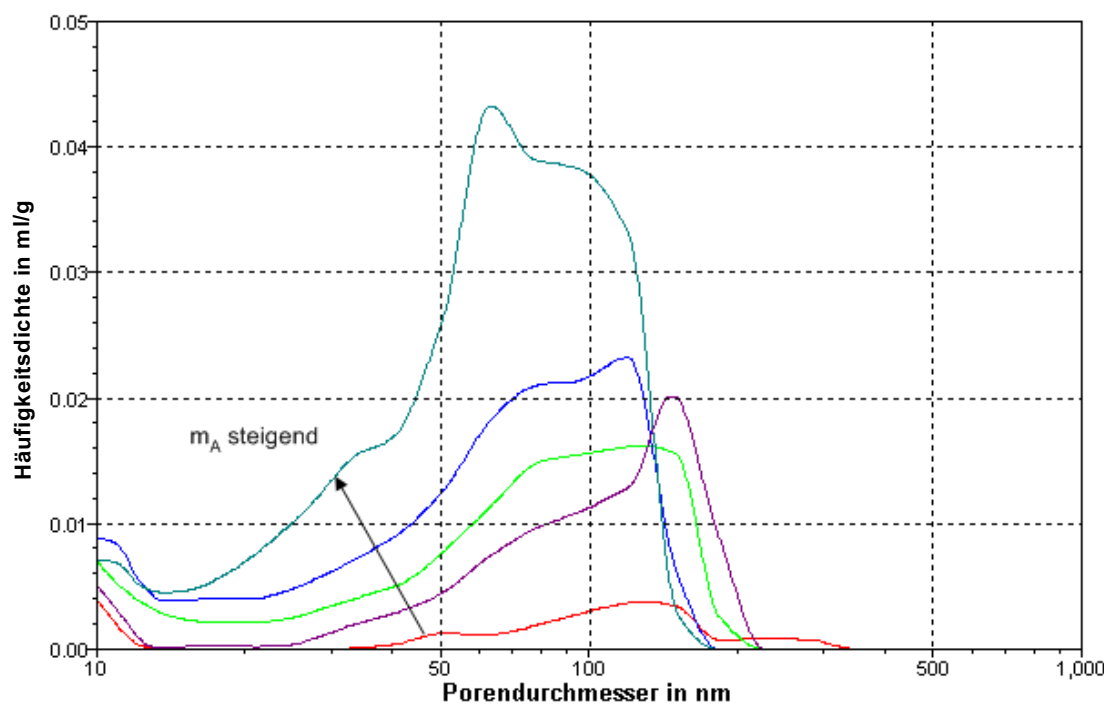


Abb. 5-13: Porengrößenverteilung der Laborstreichfarbe C3 für verschiedene Strichauftragsmassen ($m_A = 3,4 / 7,8 / 10,6 / 15,2 / 23,9 \text{ g/m}^2$)

Wie sich die Porengrößenverteilung auf die Porenoberfläche auswirkt, wird anhand der folgenden 3 Abbildungen sichtbar. Dargestellt ist für die drei oben erwähnten Streichfarben die kumulative spezifische Porenoberfläche als Funktion des Porendurchmessers.

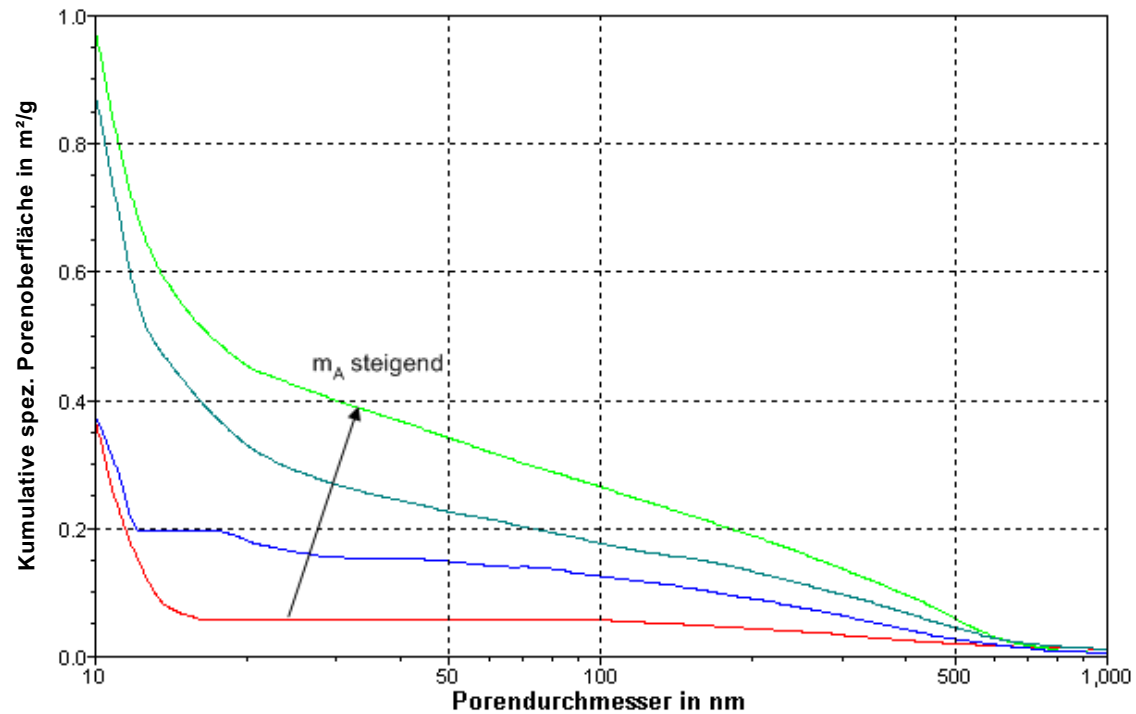


Abb. 5-14: Kumulative spezifische Porenoberfläche der Praxisstreichfarbe K1 für verschiedene Strichauftragsmassen ($m_A = 2,5 / 5 / 7,5 / 10 \text{ g/m}^2$)

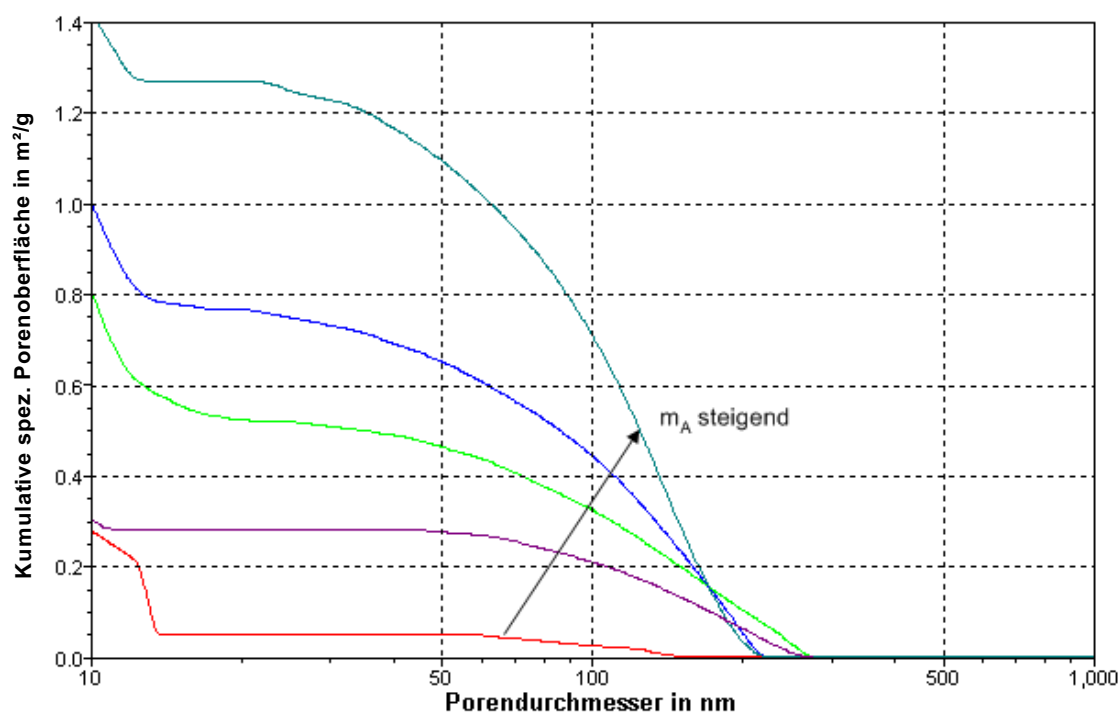


Abb. 5-15: Kumulative spezifische Porenoberfläche der Laborstreichfarbe C2 für verschiedene Strichauftragsmassen ($m_A = 3,4 / 7,8 / 10,6 / 15,2 / 23,9 \text{ g/m}^2$)

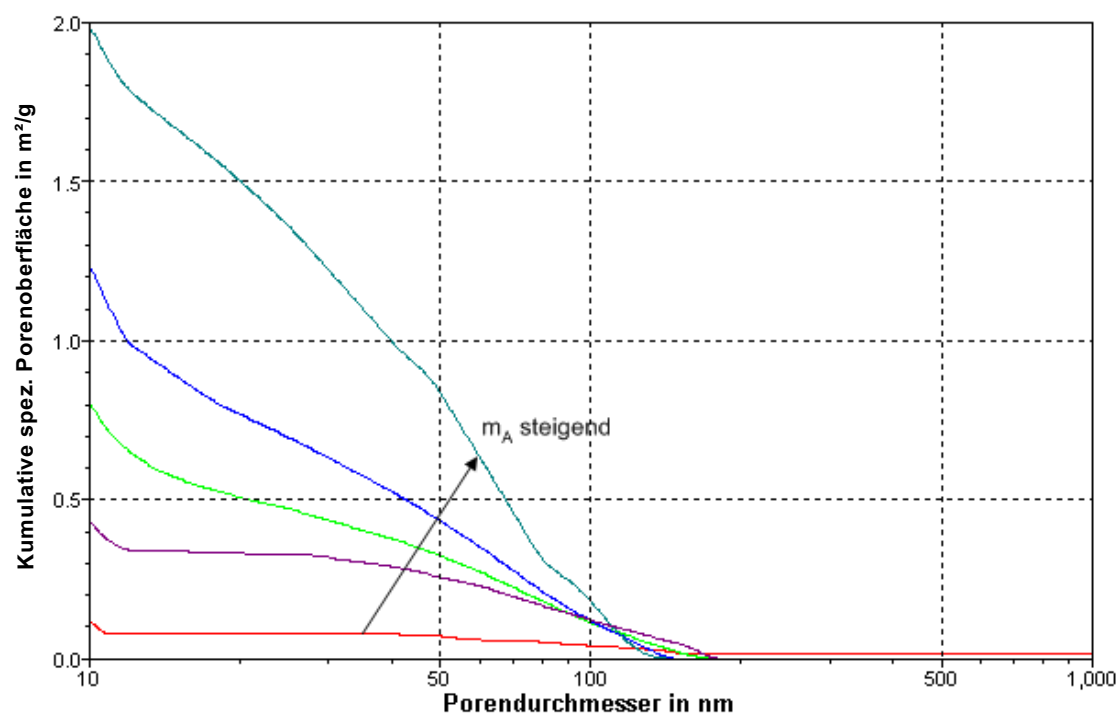


Abb. 5-16: Kumulative spezifische Porenoberfläche der Laborstreichfarbe C3 für verschiedene Strichauftragsmassen ($m_A = 3,4 / 7,8 / 10,6 / 15,2 / 23,9 \text{ g/m}^2$)

Die Abbildungen machen deutlich, wie stark die Porenoberfläche vom Anteil kleiner Poren beeinflusst wird. Ferner zeigt sich am Beispiel der Laborstreichfarbe C3, dass eine große Porenoberfläche allein nicht zwangsläufig mit einem hohen Streuvermögen einhergeht. In diesem Fall wird die große Oberfläche nämlich durch sehr kleine Poren generiert, die keinen Beitrag zur Streuung sichtbaren Lichts leisten können.

Durch die Untersuchung der Porengrößenverteilung an den verschiedenen Streichfarben konnte festgestellt werden, dass mit zunehmender Strichdicke die Größenverteilung der Poren qualitativ erhalten bleibt. Ferner war zu erkennen, dass die für die Streuung sichtbaren Lichts relevante Porenoberfläche nahezu linear mit dem Strichgewicht wächst.

5.9 Berechnung des Lichtstreuungskoeffizienten

Der dichtebezogene Lichtstreuungskoeffizient S als ein wichtiger Parameter zur Beschreibung der optischen Eigenschaften berechnet sich, basierend auf der Theorie von Kubelka und Munk, entsprechend folgender Gleichung:

$$S = \frac{10^3}{m_A} \cdot \frac{R_\infty}{1 - R_\infty^2} \cdot \ln \frac{1 - R_0 R_\infty}{1 - \frac{R_0}{R_\infty}} \quad (5-7)$$

mit m_A : flächenbezogene Masse
 R_∞ : Eigenreflexionsfaktor
 R_0 : Reflexionsfaktor des Einzelblatts

Eine Berechnung der Lichtstreuungskoeffizienten der verschiedenen Streichfarben als Funktion der flächenbezogenen Masse gemäß (5-7) führt zu Kurven mit nichtlinearem Verlauf. Beispielhaft sind in **Abb. 5-17** die Resultate für die Praxisstreichfarbe K2 sowie die Laborstreichfarben C3 und K3 wiedergegeben.

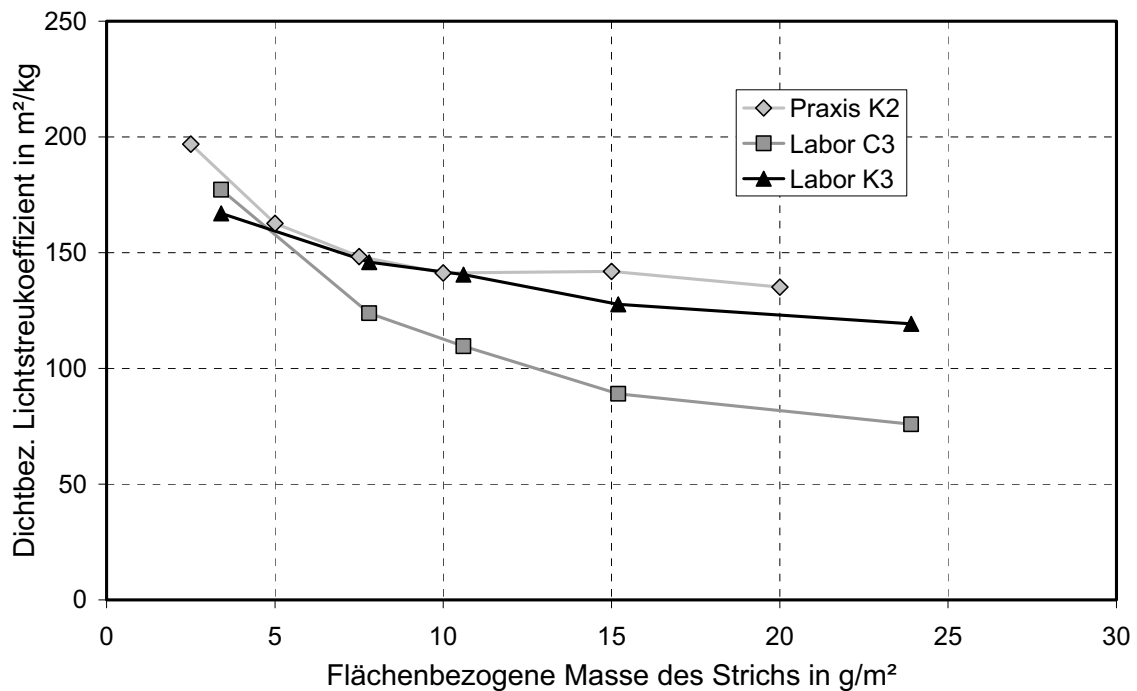


Abb. 5-17: Dichtebezogener Lichtstreuoeffizient S als Funktion der flächenbezogenen Masse für ausgewählte Streichfarben

Charakteristisch für alle untersuchten Streichfarben ist der ansteigende Verlauf des Streukoeffizienten bei abnehmendem Strichgewicht. Dieses Phänomen steht jedoch im Widerspruch zur Theorie von Kubelka und Munk, denn eine Voraussetzung zur Anwendbarkeit dieser Theorie ist die Annahme eines über die Dicke konstanten und dickenunabhängigen Streukoeffizienten. Diese Voraussetzung ist hier offenbar nicht erfüllt. Bei genauerer Betrachtung wird aber deutlich, dass das Messverfahren, welches bei der Ermittlung der Reflexionsfaktoren zur Anwendung kommt, gewisse Unzulänglichkeiten aufweist, die zu einer Verfälschung der berechneten Werte des Streukoeffizienten führen. In **Abb. 5-18** ist schematisch dargestellt, wie sich ein auf eine Strichschicht auftreffender Lichtstrom in Abhängigkeit von der Schichtdicke in verschiedene Teilströme aufteilt. Der reflektierte Anteil nimmt mit wachsender Schichtdicke zu, während gleichzeitig weniger Licht transmittiert und absorbiert wird. Unter der Voraussetzung, dass die Oberflächenstruktur des Strichs unabhängig von der Schichtdicke ist, ergibt sich für alle Schichtdicken vom Betrag her ein konstanter Anteil der regulären Reflexion. Dieser Anteil hängt vom Brechungsindex n des beleuchteten Körpers ab und beträgt bei diffuser Beleuchtung für $n = 1,5$ etwa 10 % [3]. Der einfallende Lichtstrom wird also unabhängig von der Schichtdicke aufgrund regulärer Reflexion bereits um 10 % geschwächt, bevor Streuvorgänge durch die Strichbe-

standteile stattfinden können. Je dünner die Strichschicht daher ist, umso stärker fällt dieser Effekt ins Gewicht.

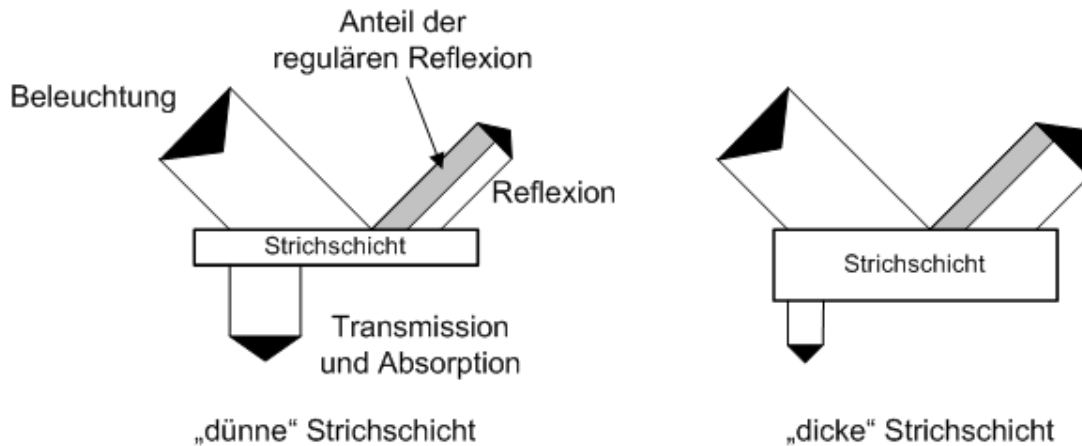


Abb. 5-18: Schematische Darstellung der Lichtströme an unterschiedlich dicken Strichschichten

Da aufgrund des eingesetzten Messverfahrens zur Bestimmung von R_0 der Anteil der regulären Reflexion nicht separat, sondern immer nur die Gesamtreflexion erfasst werden kann, wächst mit abnehmendem Strichgewicht der Fehler im ermittelten Wert von R_0 demnach immer weiter. Auf diese Weise erhält man für niedrige Strichgewichte deutlich zu hoch liegende Beträge des Streukoeffizienten.

Um den Fehler bei der Bestimmung von S möglichst klein zu halten, bietet sich die Möglichkeit, statt des Streukoeffizienten das Streuvermögen zu betrachten. Das Streuvermögen berechnet sich als Produkt aus dem Streukoeffizienten und der flächenbezogenen Masse und stellt damit eine dimensionslose Kenngröße dar. Stellt man das Streuvermögen als Funktion der flächenbezogenen Masse dar, so ergeben sich annähernd lineare Kurvenverläufe. In **Abb. 5-19** sind für ausgewählte Streichfarben die entsprechenden Messkurven aufgetragen.

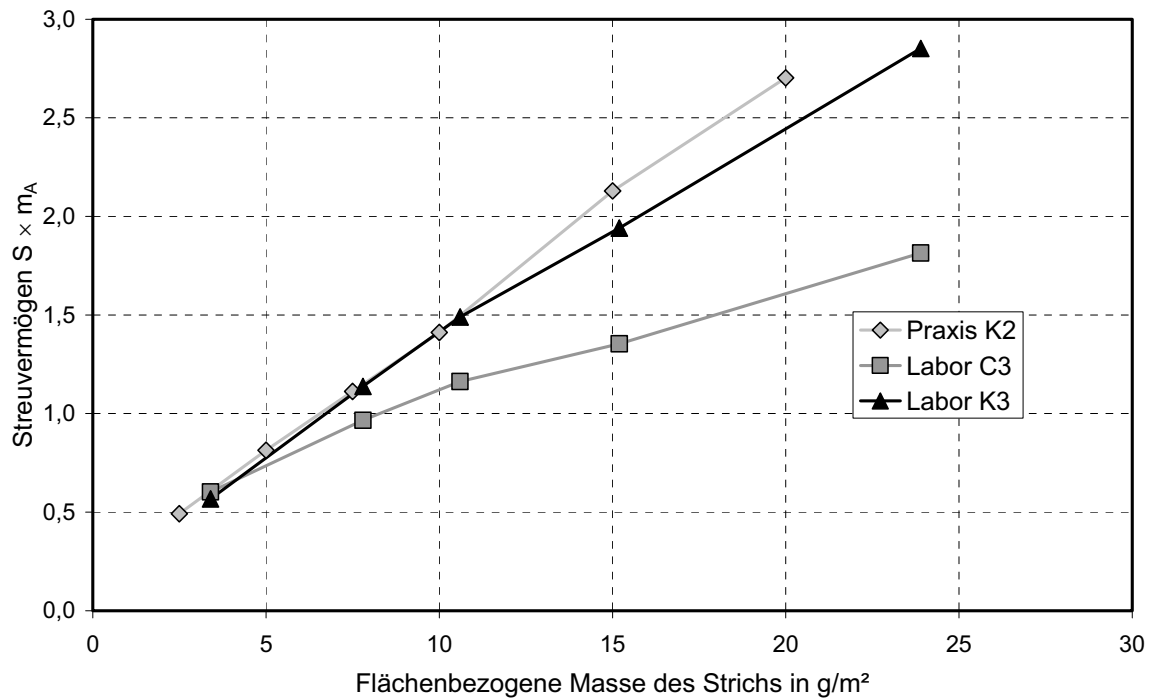


Abb. 5-19: Streuvermögen als Funktion der flächenbezogenen Masse ausgewählter Streichfarben

Legt man durch die Messpunkte einer Streichfarbe eine Ausgleichsgerade, so lässt sich der Zusammenhang zwischen Streuvermögen und flächenbezogener Masse in guter Näherung durch eine lineare Funktion beschreiben. Die Steigung der Geraden entspricht in diesem Fall dem Streukoeffizienten.

Die Betrachtung des Streuvermögens ermöglicht ferner, eine Verbindung zwischen optischen und Struktureigenschaften der Streichfarbenschichten herzustellen. Wie **Abb. 5-20** zeigt, besteht zwischen dem Streuvermögen und der Licht streuenden Oberfläche der Poren ein enger Zusammenhang. Das Streuvermögen einer Strichschicht wächst demnach nahezu linear mit der effektiv vorhandenen Oberfläche der im sichtbaren Wellenlängenbereich streuenden Poren an.

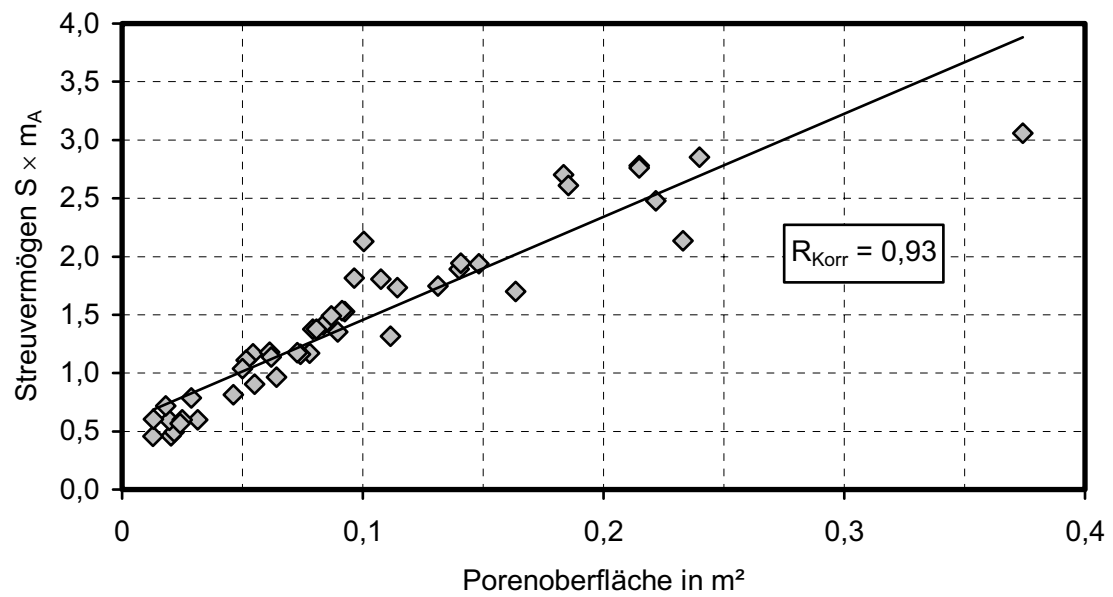


Abb. 5-20: Streuvermögen als Funktion der Porenoberfläche (Porendurchmesser 100 bis 600 nm) aller untersuchten Streichfarben und Strichdicken mit Ausgleichsgerade

6 Modellierung gestrichener Papiere

6.1 Allgemeine Bemerkungen

Im Gegensatz zu ungestrichenen Papieren, bei denen die einzelnen Komponenten als nahezu homogen über die Blattdicke verteilt angenommen werden können, muss bei der Betrachtung gestrichener Papiere ein Schichtenmodell zugrunde gelegt werden. Im einfachsten Fall lässt sich ein einseitig gestrichenes Papier als Zweischichtsystem auffassen, bei dem die Streichfarbe als separate Schicht auf dem Rohpapier liegt. Da beim Streichprozess insbesondere von leichtgewichtigen Papieren aber in aller Regel ein gewisser Teil der Streichfarbe ins Rohpapier eindringt, ist das Zweischichtmodell eher eine idealisierte Vorstellung der realen Verhältnisse. Daher liegt es näher, ein Dreischichtmodell anzunehmen, bei dem sich zwischen dem Rohpapier und der Strichschicht eine Mischschicht ausbildet. Diese Mischschicht entsteht durch das partielle Eindringen von Streichfarbenkomponenten in die oberen Bereiche des Rohpapiers und stellt infolgedessen eine mehr oder weniger homogene Mischung dar. **Abb. 6-1** demonstriert den grundsätzlichen Unterschied zwischen dem Zwei- und dem Dreischichtmodell.

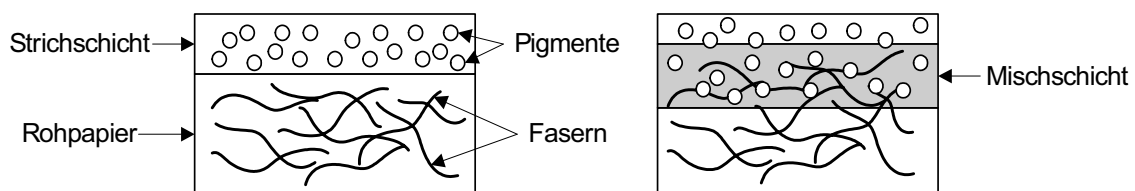


Abb. 6-1: Modellvorstellung eines gestrichenen Papiers; links: Zweischichtsystem aus Rohpapier und Strichschicht; rechts: Dreischichtsystem mit zwischengelagerter Mischschicht

Die Mischschicht ist im Gegensatz zu Rohpapier und Strichschicht der direkten Beobachtung nicht zugänglich. Zur Modellierung dieser Schicht müssen daher geeignete Annahmen hinsichtlich ihrer Dicke und Zusammensetzung getroffen werden, damit das Gesamtsystem berechenbar wird. Grundlage aller folgenden Modellrechnungen ist dabei Gleichung (3-15), die sich als Lösung der Kubelka-Munk-Differenzialgleichungen ergibt.

Als Ausgangspunkt für die Bewertung der Modellierung dienen die Daten der einseitig gestrichenen Papiere. In **Tabelle 1** sind die wichtigsten Kenngrößen dieser Papiere wieder-

gegeben. Das Trägermaterial war in allen Fällen ein industriell produziertes LWC-Streichrohpapier mit einer flächenbezogenen Masse von 42,5 g/m². Die Bezeichnung der Streichfarben entspricht der in Kap. 5.2 beschriebenen Systematik.

Tabelle 1: Applizierte Streichfarbenmenge, Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ , dichtebezogener Lichtstreuungskoeffizient S und dichtebezogener Lichtabsorptionskoeffizient K der einseitig gestrichenen Papiere

Streichfarbe	Flächenbezogene Masse des Strichs g/m ²	R_0 %	R_∞ %	S m ² /kg	K m ² /kg
Praxis K1	6,3	70,89	78,19	64,45	1,96
	9,4	73,88	79,89	72,13	1,83
	13,4	76,19	81,19	77,71	1,69
Praxis K2	5,0	68,90	77,68	58,31	1,87
	10,0	74,48	80,91	71,82	1,62
	15,0	77,07	82,38	77,31	1,46
Praxis C	5,0	69,97	78,34	61,56	1,84
	10,0	74,28	80,96	70,52	1,58
	15,0	76,65	82,38	74,37	1,40
Labor C1	5,9	68,36	77,72	55,11	1,76
	9,6	70,30	78,71	56,80	1,64
	15,1	73,27	80,55	60,20	1,41
	19,9	75,77	82,07	64,24	1,26
Labor C2	5,3	68,89	77,96	57,43	1,79
	9,0	71,53	79,37	61,48	1,65
	13,3	74,85	81,53	67,96	1,42
	19,4	77,08	82,85	70,28	1,25
Labor C3	5,8	67,77	77,28	53,76	1,80
	9,1	70,09	78,34	57,16	1,71
	14,5	72,43	79,80	58,57	1,50
	20,0	74,46	81,00	60,01	1,34
Labor K1	5,1	67,58	76,41	55,22	2,01
	7,3	70,08	77,72	60,42	1,93
	11,0	72,84	79,12	66,23	1,82
	16,0	75,23	80,30	70,95	1,71
Labor K2	4,6	67,67	76,58	55,86	2,00
	6,1	69,96	77,82	61,16	1,93
	11,1	73,28	79,47	67,58	1,79
	14,5	75,29	80,52	72,39	1,71
Labor K3	5,3	67,15	76,38	53,47	1,95
	7,3	69,98	77,81	59,79	1,89
	10,4	73,30	79,33	69,01	1,86
	15,5	74,99	80,18	70,38	1,72

Als Vergleichsgröße zwischen Modell und gestrichenem Papier werden im Folgenden die Werte für die Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ herangezogen. Die Wahl dieser Größen bietet sich an, da sie direkt vom Farbmessgerät ausgegeben werden. Die Kubelka-Munk-Koeffizienten S und K sind dagegen bereits mehr oder weniger stark fehlerbehaftet, wie in Kap. 6.3 dargelegt wird. Im Messgerät werden die Reflexionswerte der jeweiligen Probe von Sensoren erfasst, deren Empfindlichkeitsmaxima bei unterschiedlichen Wellenlängen liegen. In Kombination mit einer ausreichend schmalen Bandbreite der Empfindlichkeit erhält man auf diese Weise den spektralen Verlauf der Reflexion der Probe. Beispielhaft ist das Reflexionsspektrum des LWC-Rohpapiers in **Abb. 6-2** dargestellt.

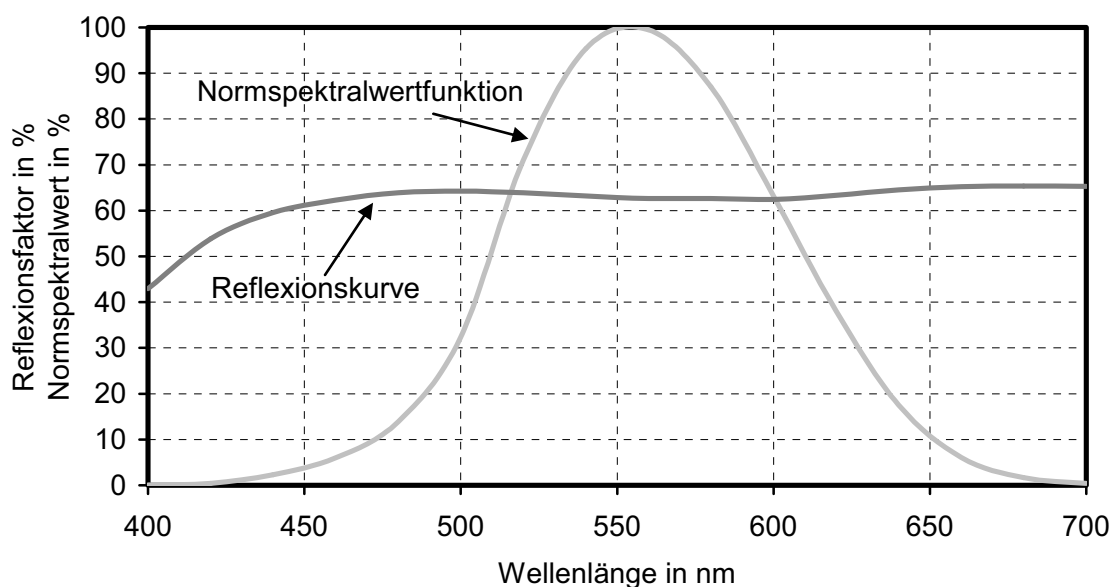


Abb. 6-2: Spektraler Verlauf des Reflexionswerts R_0 des LWC-Rohpapiers sowie des Normspektralwerts \bar{y}

Mithilfe einer Gewichtungsfunktion kann der Kurvenverlauf der Reflexion auf eine einzige Größe reduziert werden. Diese ebenfalls in Abb. 6-2 dargestellte Gewichtungsfunktion beschreibt den spektralen Verlauf des Normspektralwerts \bar{y} , welcher das Helligkeitsempfinden des menschlichen Auges widerspiegelt. Über eine in DIN 5033 [118] festgelegte Rechenvorschrift lässt sich ein Wert berechnen, der als Hellbezugswert bezeichnet wird und ein Maß für die Helligkeit der Probe darstellt. Die auf diese Weise ermittelten Werte der Reflexionskurven von R_0 und R_∞ bilden die Grundlage aller durchgeführten Berechnungen.

Die folgende Darstellung verschiedener Modelle beschränkt sich auf solche Ansätze, bei denen die Ausbildung der unterschiedlichen Schichten im Wesentlichen mit den visuellen Beobachtungen in Einklang zu bringen ist. Für die Beschreibung der Mischschicht wird dabei eine parametrisierte Form gewählt, da eine genaue Analyse dieser Schicht aus den weiter oben erwähnten Gründen nicht möglich ist. Es wird der Versuch unternommen, mathematisch einfach zu formulierende Modelle zu finden, welche zum einen die gemessenen Werte möglichst genau widerspiegeln und zum anderen einer Überprüfung auf physikalische Plausibilität standhalten.

6.2 Rechnerische Überprüfung des Schichtenmodells nach Kubelka-Munk

Um die Frage zu klären, ob die Berechnungen des Schichtenmodells nach Kubelka-Munk und die Resultate der Messungen vergleichbare Werte liefern, wurden verschiedene Messreihen durchgeführt, in denen jeweils die optischen Eigenschaften ermittelt wurden. Grundlage dieser Versuche war ein Schichtsystem aus LWC-Rohpapier und gestrichenen Folien, die im Wechsel übereinander gestapelt wurden.

Die Messungen erfolgten mit einem Elrepho 2000. Ausgehend von einem Zweischichtsystem, bestehend aus einem Blatt Rohpapier mit darüber gelegter gestrichener Folie, wurden sukzessive weitere Schichten hinzugefügt und jeweils der Reflexionsfaktor ermittelt.

Die rechnerische Ermittlung der Reflexionsfaktoren erfolgte entsprechend der in Kap. 3.3.3.2 beschriebenen Vorgehensweise. Mit Kenntnis der Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ der einzelnen Schichten, also des Rohpapiers sowie der gestrichenen Folien, lässt sich mithilfe von (3-15) der Reflexionsfaktor des Schichtsystems berechnen.

In den Versuchsreihen wurden zum einen die Proben der verschiedenen Streichfarben mit Strichgewichten von etwa 10 g/m^2 , welches einem für LWC-Papiere üblichen Auftragsgewicht entspricht, und zum anderen alle Variationen des Strichgewichts der Laborstreichfarbe K1 untersucht, um einen möglichst großen Flächenmassebereich zu erfassen. Als Bezugsgrößen für die Angabe der Fehler dienten jeweils die gemessenen Werte der Reflexionsfaktoren.

In **Abb. 6-3** sind exemplarisch die Resultate der Praxisstreichfarbe K2 für eine flächenbezogene Masse von 10 g/m^2 dargestellt. Aufgetragen ist der Reflexionsfaktor in Abhängigkeit von der Anzahl der insgesamt übereinander liegenden Schichten. Beginnend mit dem System aus jeweils einer Schicht Rohpapier und darüber liegender gestrichener Folie ergibt sich durch das abwechselnde Hinzufügen von Rohpapier und Folie ein gegen einen Grenzwert, den Eigenreflexionsfaktor R_∞ , strebender Verlauf des Reflexionsfaktors. Bei einer geraden Anzahl von Schichten befindet sich eine gestrichene Folie an der obersten Position, während bei einer ungeraden Anzahl ein Blatt Rohpapier oben liegt. Infolge der größeren Helligkeit der Streichfarbe erreicht bei oben liegender Folie der Reflexionsfaktor des Schichtsystems einen höheren Wert im Vergleich zum System mit oben liegendem Rohpapier. Daher sind zwei unterschiedliche Kurvenverläufe erkennbar, die asymptotisch gegen ihren jeweiligen Eigenreflexionswert streben.

Der Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten ergibt für den in Abb. 6-3 dargestellten Fall Abweichungen der Reflexionsfaktoren von weniger als 1 %. Vergleichbar geringe Unterschiede lassen sich bei allen Streichfarben auf Basis von Kaolin mit Strichgewichten von 10 g/m^2 erkennen. Etwas größere Fehler von bis zu 2 % zeigen die Versuche mit Calciumcarbonat-basierten Streichfarben und Strichgewichten von 10 g/m^2 . Bei der Versuchsreihe mit der Laborstreichfarbe K1 treten die größten Differenzen von 1,6 % bei der geringsten Strichstärke von $3,4 \text{ g/m}^2$ auf. Höhere Strichgewichte führen zu noch geringen Abweichungen zwischen gemessenem und berechnetem Reflexionsfaktor, die sämtlich weniger als 1 % betragen.

Anhand der Versuchsreihen konnte gezeigt werden, dass die Berechnungen des Schichtmodells entsprechend der aus der Kubelka-Munk-Theorie abgeleiteten Gleichung mit den tatsächlich messbaren Resultaten in guter Übereinstimmung stehen. Die Differenz der gemessenen und berechneten Reflexionsfaktoren betrug in keinem der betrachteten Fälle mehr als 2 % und lag mehrheitlich sogar unter 1 %.

Weiterhin ließen die Untersuchungen erkennen, dass beim betrachteten System, welches im Hinblick auf die Flächenmasse der einzelnen Schichten einem typischen LWC-Papier nahe kommt, bereits nach einigen wenigen Schichten der maximale Reflexionsfaktor erreicht wird und ein Hinzufügen weiterer Schichten diesen nicht weiter erhöht.

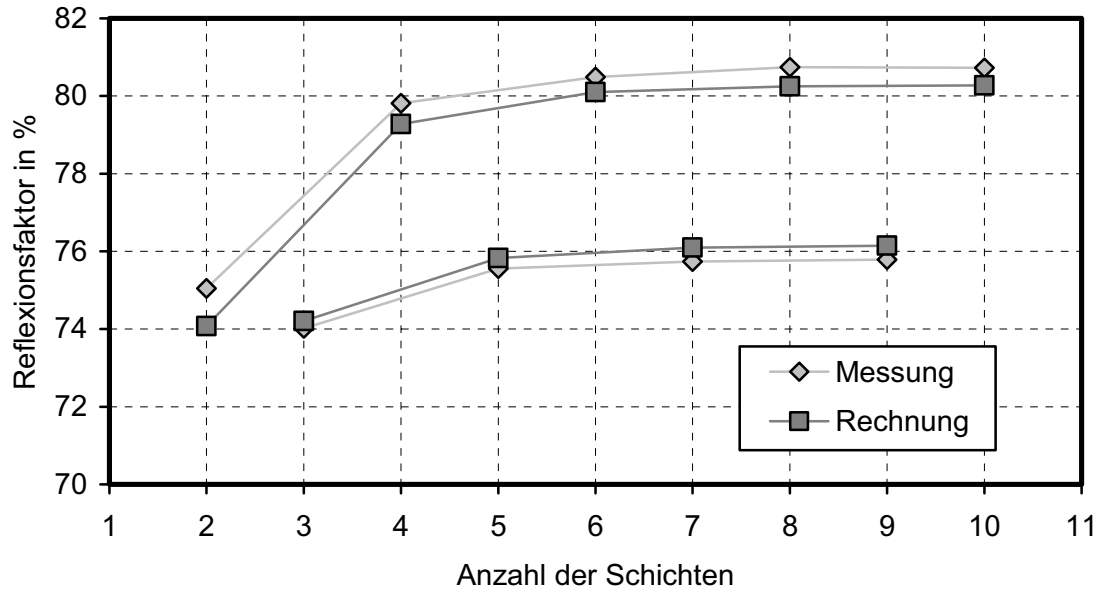


Abb. 6-3: Reflexionsfaktoren der Schichtsysteme aus Rohpapier und gestrichenen Folien für die Praxisstreichfarbe K2 (flächenbezogene Masse des Strichs: 10 g/m²)

6.3 Fehlerbetrachtung der Kubelka-Munk-Koeffizienten

Der dichtebezogene Lichtstreuoeffizient S ist gemäß (3-21) eine Funktion der 3 Parameter m_A , R_0 und R_∞ . Allgemein lässt sich die Fehlerschranke Δf einer Funktion $f(x_1, \dots, x_k)$ der Variablen x_1, \dots, x_k mit den Fehlerschranken Δa_i der Messwerte a_i durch das totale Differenzial annähern [68]:

$$\Delta f \approx \sum_{i=1}^k \Delta a_i \left| f_{x_i}(a_1, \dots, a_k) \right| \quad (6-1)$$

$$S = \frac{1}{m_A} \frac{1}{\frac{1}{R_\infty} - R_0} \ln \frac{1 - R_0 R_\infty}{1 - \frac{R_0}{R_\infty}} \quad (6-2)$$

Auf S übertragen ergibt sich demnach als Fehlerschranke ΔS :

$$\Delta S \approx \Delta m_A \left| \frac{dS}{dm_A} \right| + \Delta R_0 \left| \frac{dS}{dR_0} \right| + \Delta R_\infty \left| \frac{dS}{dR_\infty} \right| \quad (6-3)$$

- Berechnung von $\frac{dS}{dm_A}$:

$$\frac{dS}{dm_A} = -\frac{1}{m_A^2} \frac{1}{\frac{1}{R_\infty} - R_\infty} \ln \frac{1 - R_0 R_\infty}{1 - \frac{R_0}{R_\infty}} \quad (6-4)$$

- Berechnung von $\frac{dS}{dR_0}$:

$$S(R_0) = c f(R_0) \text{ mit } c = \frac{1}{m_A} \frac{1}{\frac{1}{R_\infty} - R_\infty} \text{ und } f(R_0) = \ln \frac{1 - R_0 R_\infty}{1 - \frac{R_0}{R_\infty}}$$

Mit $\frac{d}{dx} \ln f(x) = \frac{1}{f(x)} \frac{df(x)}{dx}$ folgt:

$$\frac{dS}{dR_0} = c \frac{1}{\frac{1 - R_0 R_\infty}{1 - \frac{R_0}{R_\infty}}} \frac{d}{dR_0} \left[\frac{1 - R_0 R_\infty}{1 - \frac{R_0}{R_\infty}} \right] \quad (6-5)$$

$$\frac{d}{dR_0} \left[\frac{1 - R_0 R_\infty}{1 - \frac{R_0}{R_\infty}} \right] = \frac{d}{dR_0} \left[\frac{R_\infty - R_0 R_\infty^2}{R_\infty - R_0} \right] = \quad (6-6)$$

$$= \frac{(R_\infty - R_0)(-R_\infty^2) + R_\infty - R_0 R_\infty^2}{(R_\infty - R_0)^2} = \frac{-R_\infty^3 + R_0 R_\infty^2 + R_\infty - R_0 R_\infty^2}{(R_\infty - R_0)^2} = \frac{R_\infty^2(1 - R_\infty)}{(R_\infty - R_0)^2}$$

$$\frac{dS}{dR_0} = \frac{1}{m_A} \frac{1}{\frac{1}{R_\infty} - R_\infty} \frac{1 - \frac{R_0}{R_\infty}}{1 - R_0 R_\infty} \frac{R_\infty^2(1 - R_\infty)}{(R_\infty - R_0)^2} \quad (6-7)$$

Umformen von (6-6) führt zu:

$$\frac{dS}{dR_0} = \frac{1}{m_A} \frac{R_\infty^2(1 - R_\infty)}{(1 - R_\infty^2)(1 - R_0 R_\infty)(R_\infty - R_0)} \quad (6-8)$$

- Berechnung von $\frac{dS}{dR_\infty}$:

$$S(R_\infty) = c \cdot f(R_\infty) \cdot g(R_\infty) \text{ mit } c = \frac{1}{m_A}, \quad f(R_\infty) = \frac{R_\infty}{1 - R_\infty^2} \text{ und } g(R_\infty) = \ln \frac{1 - R_0 R_\infty}{1 - \frac{R_0}{R_\infty}}$$

$$\text{Mit } \frac{dS(R_\infty)}{dR_\infty} = c \left[\frac{df(R_\infty)}{dR_\infty} g(R_\infty) + f(R_\infty) \frac{dg(R_\infty)}{dR_\infty} \right] \text{ folgt:}$$

$$\frac{df(R_\infty)}{dR_\infty} = \frac{(1 - R_\infty^2) - R_\infty(-2R_\infty)}{(1 - R_\infty^2)^2} = \frac{1 + R_\infty^2}{(1 - R_\infty^2)^2} \quad (6-9)$$

$$\frac{dg(R_\infty)}{dR_\infty} = \frac{R_\infty - R_0}{R_\infty - R_0 R_\infty^2} \frac{d}{dR_\infty} \left[\frac{R_\infty - R_0 R_\infty^2}{R_\infty - R_0} \right] \quad (6-10)$$

$$\frac{d}{dR_\infty} \left[\frac{R_\infty - R_0 R_\infty^2}{R_\infty - R_0} \right] = \frac{(R_\infty - R_0)(1 - R_0 R_\infty) - R_\infty + R_0 R_\infty^2}{(R_\infty - R_0)^2} = \frac{R_\infty(R_0^2 - 1)}{(R_\infty - R_0)^2} \quad (6-11)$$

$$\frac{dg(R_\infty)}{dR_\infty} = \frac{R_\infty - R_0}{R_\infty - R_0 R_\infty^2} \frac{R_\infty(R_0^2 - 1)}{(R_\infty - R_0)^2} = \frac{R_0^2 - 1}{(1 - R_0 R_\infty)(R_\infty - R_0)} = \frac{R_0^2 - 1}{R_\infty(1 + R_0^2) - R_0(1 + R_\infty^2)} \quad (6-12)$$

$$\frac{dS(R_\infty)}{dR_\infty} = \frac{1}{m_A} \left[\frac{1 + R_\infty^2}{(1 - R_\infty^2)^2} \ln \frac{1 - R_0 R_\infty}{1 - \frac{R_0}{R_\infty}} + \frac{R_\infty}{1 - R_\infty^2} \frac{R_0^2 - 1}{R_\infty(1 + R_0^2) - R_0(1 + R_\infty^2)} \right] \quad (6-13)$$

$$\frac{dS(R_\infty)}{dR_\infty} = \frac{1}{m_A(1 - R_\infty^2)} \left[\frac{1 + R_\infty^2}{1 - R_\infty^2} \ln \frac{1 - R_0 R_\infty}{1 - \frac{R_0}{R_\infty}} + \frac{R_\infty(R_0^2 - 1)}{R_\infty(1 + R_0^2) - R_0(1 + R_\infty^2)} \right] \quad (6-14)$$

Gemäß (6-2) sind nun die Beträge der Differenziale (6-3), (6-7) und (6-13) mit den Fehler-schranken der jeweiligen Variablen zu multiplizieren und aufzusummieren, um den Fehler ΔS zu erhalten. Die komplexe, nichtlineare Form der Differenziale lässt den Schluss zu, dass bereits geringe Abweichungen der Parameter m_A , R_0 und R_∞ einen erheblichen Fehler

in S nach sich ziehen. Bei der Bestimmung von K wird dieser Fehler noch größer, da K gemäß (3-23) aus S und R_∞ berechnet wird.

Die Parameter m_A , R_0 und R_∞ beeinflussen den Fehler in S und K in unterschiedlicher Weise. Der Fehler in der flächenbezogenen Masse findet sich in gleicher Größenordnung im Fehler in S wieder, während ein Fehler im Reflexionsfaktor R_0 den Fehler in S auf ein Mehrfaches erhöht. Der Eigenreflexionsfaktor R_∞ schließlich wirkt sich nicht so gravierend auf S aus wie R_0 , lässt aber den Fehler in K überproportional ansteigen. Der Fehler, der sich letztendlich für S und K ergibt, hängt dabei nicht nur von den relativen Fehlern der Variablen, sondern auch von deren absoluter Höhe ab. Beispielrechnungen zeigen, dass bei gleichem relativem Fehler der Ausgangswerte die Abweichung in S und insbesondere in K umso größer ist, je höher die Werte der Reflexionsfaktoren liegen. Aus diesem Grund werden für die Beurteilung der Übereinstimmung zwischen Modell und Experiment in erster Linie nicht die Kubelka-Munk-Koeffizienten S und K , sondern die Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ herangezogen. Ferner kann auf diese Weise die flächenbezogene Masse als potenzielle Fehlerquelle ausgeschlossen werden.

6.4 Einseitig gestrichene Papiere

6.4.1 Allgemeine Bemerkungen

Die Mehrzahl der gestrichenen grafischen Papiere weist sowohl auf der Oberseite als auch auf der Unterseite eine Strichschicht auf. Um aber die Zahl der freien Parameter möglichst überschaubar zu halten, beschränkt sich die Modellierung vorerst auf einseitig gestrichene Papiere. Auf diese Weise soll zunächst ein passendes Modell gefunden werden, mit dem anschließend auch die Anwendbarkeit auf beidseitig gestrichene Papiere geprüft wird.

Ein weiterer Grund für die anfängliche Beschränkung der Untersuchungen auf einseitig gestrichene Proben liegt in der Messung der Porengrößenverteilung. Da bei diesem Verfahren die Poren der Größe nach mit Quecksilber gefüllt werden, beginnend mit den größten Poren, hätte ein beidseitig gestrichenes Papier Verfälschungen der Messergebnisse zur Folge. In diesem Fall müsste nämlich das Quecksilber zunächst die kleineren Poren der Strichschichten durchdringen, bevor die größeren Poren des innen liegenden Rohpapiers gefüllt werden könnten. Um also korrekte Daten bezüglich der Porenstruktur zu erhalten, ist die Analyse an einseitig gestrichenen Papieren erforderlich.

6.4.2 Modellierung der Mischschicht

6.4.2.1 Zusammensetzung und Aufbau der Mischschicht

Die Problematik bei der Modellierung der Mischschicht liegt darin, dass weder die Menge der in das Rohpapier eingedrungenen Streichfarbe noch das Konzentrationsgefälle direkt beobachtet werden können. Darüber hinaus unterliegt die Strichschicht starken Dickschwankungen, wie anhand **Abb. 6-4** zu erkennen ist. Dargestellt sind hier zwei Mikroskopaufnahmen von Mikrotomschnitten gestrichener Papiere bei Beleuchtung im Durchlicht. Die dunklere Schicht an der Oberseite der Proben kennzeichnet die Strichschicht, die wegen ihrer im Vergleich zum Fasermaterial höheren Opazität im Durchlicht dunkler erscheint. Gut zu erkennen ist die starke Schwankung der Dicke der Streichfarbenschicht, die im Wesentlichen aus dem ungleichmäßigen Dickenprofil des Rohpapiers resultiert. Darüber hinaus wird auch das unterschiedliche Eindringen der Streichfarbe in das Papier deutlich. Während bei der Probe in der oberen Bildhälfte die Strichschicht sich relativ klar vom Rohpapier abgrenzen lässt, zeigt die Probe in der unteren Bildhälfte eine starke Penetration des Strichs mit einer ausgeprägten Mischschicht.

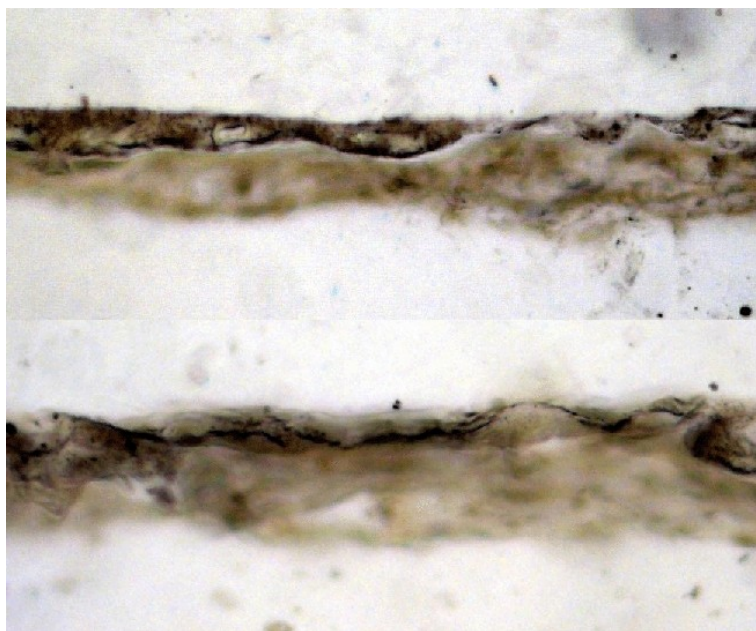


Abb. 6-4: Lichtmikroskopische Aufnahmen von Mikrotomschnitten gestrichener Papiere bei Durchlichtbeleuchtung

Um den Aufbau der Mischschicht zu beschreiben, sind daher 3 Parameter festzulegen:

1. Massenanteil μ der Streichfarbe, die ins Rohpapier eindringt

$$\mu = \frac{m_A'(\text{Strich})}{m_A(\text{Strich})} \quad (6-15)$$

mit $m_A(\text{Strich})$: flächenbezogene Masse des gesamten applizierten Strichs
 $m_A'(\text{Strich})$: flächenbezogene Masse der ins Rohpapier eingedrungenen Streichfarbe

2. Flächenbezogene Masse $m_A'(RP)$ der Rohpapierschicht, die von Streichfarbe benetzt wird
3. Verlauf der Streichfarbenkonzentration in der Mischschicht

Der Wert von μ kann zwischen 0 bei kompletter Trennung von Rohpapier und Strich und 1 im Fall des vollständigen Eindringens der Streichfarbe liegen. Unabhängig von μ kann $m_A'(RP)$ sämtliche Werte von Null bis zum gesamten Rohpapierquerschnitt umfassen. Schließlich kann die Änderung der Streichfarbenkonzentration innerhalb der Mischschicht einer beliebigen stetigen Funktion folgen. In **Abb. 6-5** sind drei mögliche Konzentrationsverläufe dargestellt. Neben einer linearen Abnahme sind auch Konzentrationsänderungen mit sinkendem und steigendem Gradienten denkbar.

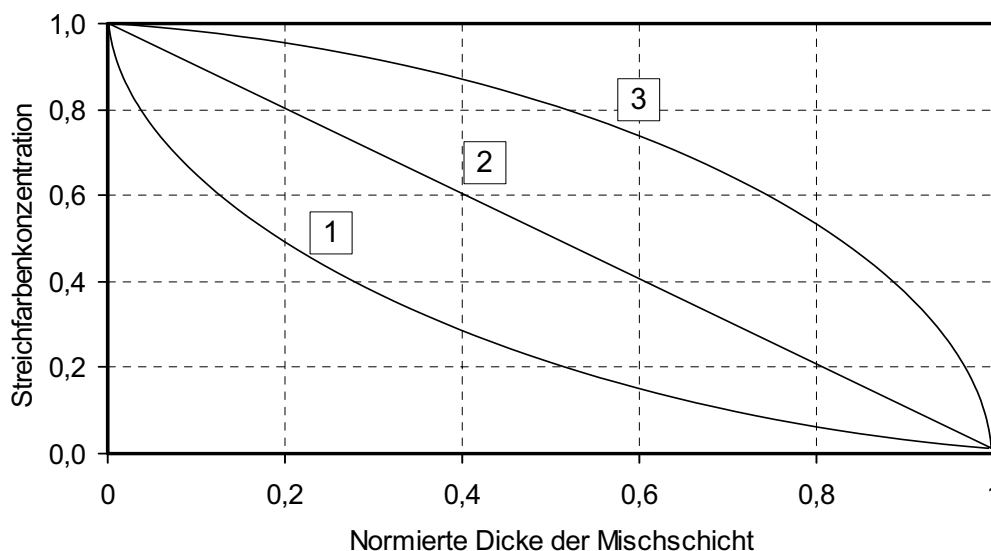


Abb. 6-5: Mögliche Verläufe der Streichfarbenkonzentration innerhalb der Mischschicht
 (1: sinkender Gradient; 2: konstanter Gradient; 3: wachsender Gradient)

Welchem Verlauf die Streichfarbenkonzentration folgt, entzieht sich wie erwähnt der direkten Beobachtung. Eine analytische Lösung der in Abb. 6-5 beschriebenen Fälle ist zwar möglich, führt aber, wie Yang und Kruse am Beispiel der Druckfarbenpenetration zeigten, zu komplexen Differenzialgleichungssystemen [119]. Daher basieren die nachfolgenden Modellierungen auf einem anderen Ansatz, bei dem nicht die Streichfarbenkonzentration, sondern die Gewichtung des Lichtstreuungskoeffizienten als Variable aufgefasst wird. Auf diese Weise kann die Änderung der Streichfarbenkonzentration über die Dicke implizit berücksichtigt werden.

Für die optischen Eigenschaften der Mischschicht ist in erster Linie die sich ausbildende Porenstruktur von Bedeutung. Diese lässt sich aber aufgrund der unbekannten Zusammensetzung nicht berechnen. Um diesen Parameter dennoch zu berücksichtigen, müssen die Kubelka-Munk-Koeffizienten S_{Misch} und K_{Misch} der Mischschicht über Gewichtungsfunktionen aus den entsprechenden Koeffizienten der Komponenten ermittelt werden:

$$S_{Misch} = \alpha S_{RP} + \beta S_{Strich} \quad (6-16)$$

$$K_{Misch} = \gamma K_{RP} + \delta K_{Strich} \quad (6-17)$$

mit S_{RP}/K_{RP} : dichtebez. Streu-/Absorptionskoeffizient des Rohpapiers
 S_{Strich}/K_{Strich} : dichtebez. Streu-/Absorptionskoeffizient des Strichs
 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$: Gewichtungsfaktoren

Das Absorptionsvermögen lässt sich in der Regel additiv aus den Einzelkomponenten berechnen, daher werden die Gewichtungsfaktoren γ und δ den jeweiligen Massenanteilen des Rohpapiers bzw. Strichs in der Mischschicht entsprechen [83/120]. Hinsichtlich des Streuvermögens ergibt sich eine andere Situation, da die resultierende Porenstruktur als bestimmender Faktor des Streukoeffizienten stark von der Wechselwirkung der verschiedenen Streichfarbenkomponenten mit dem Fasernetzwerk beeinflusst wird. Es ist daher zu erwarten, dass die Gewichtungsfaktoren α und β zum einen nicht zwangsläufig mit den Massenanteilen identisch sind und zum anderen je nach Streichfarbe variieren. Ferner lässt sich die Verteilung der Streichfarbe innerhalb der Mischschicht simulieren, indem je nach vermutetem Verlauf der Streichfarbenkonzentration die Gewichtungsfaktoren festgelegt werden.

6.4.2.2 Fallballspiele zum Aufbau der Mischschicht

Grundsätzlich sind viele verschiedene Modelle hinsichtlich der Struktur eines einseitig gestrichenen Papiers denkbar. Zur Beschreibung des Aufbaus bieten sich die Parameter μ und $m_A'(RP)$ an. Im Folgenden sind einige Modelle aufgelistet, auf die im weiteren Verlauf näher eingegangen wird:

- $\mu = 0, m_A'(RP) = 0$:
zwei separate Schichten, bestehend aus Rohpapier und Streichfarbe.
- $\mu = 1, m_A'(RP) = m_A(RP)$:
Rohpapier wird vollständig von der Streichfarbe durchtränkt.
- $0 < \mu < 1, 0 < m_A'(RP) < m_A(RP)$:
ein Teil der Streichfarbe durchdringt die obere Schicht des Rohpapiers, der Rest verbleibt als reine Strichschicht an der Oberfläche.
- $\mu = 1, m_A'(RP) < m_A(RP)$:
gesamte Streichfarbe durchdringt die obere Schicht des Rohpapiers.

Die beiden letztgenannten Punkte umfassen alle möglichen Zwischenwerte der Parameter, daher beschränkt sich die Betrachtung auf einige ausgewählte Fälle mit sinnvoller Wahl der Parameter μ und $m_A'(RP)$.

6.4.3 Einschichtmodell mit vollständig durchtränktem Rohpapier

Theoretisch wäre es denkbar, dass die Streichfarbe das Rohpapier vollständig durchtränkt, indem die Streichfarbenkomponenten an den Kapillaren innerhalb des Fasernetzwerks entlang in Richtung Blattunterseite wandern. Geht man vereinfachend davon aus, dass kein Konzentrationsgefälle der Streichfarbe über der Dicke auftritt, dann erhält man ein Einschichtmodell mit einer gleichmäßigen Verteilung der Streichfarbe über den Rohpapierquerschnitt. In diesem Fall lassen sich anhand der Mischungsregel über (3-29) und (3-30) die Kubelka-Munk-Koeffizienten dieser Schicht und anschließend mithilfe von (3-21) und (3-23) die Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ berechnen.

In **Abb. 6-6** und **Abb. 6-7** sind die Abweichungen dargestellt, die sich zwischen den berechneten Werten der Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ sowie den gemessenen Werten der

gestrichenen Papiere ergeben. Als Bezugsgröße dient jeweils der gemessene Wert des gestrichenen Papiers. Grundlage für die Berechnung des Systems sind die flächenbezogenen Massen der gestrichenen Papiere entsprechend Tabelle 1. Die Auftragsmasse des Strichs steigt dabei in den Abbildungen für den jeweiligen Streichfarbentyp von links nach rechts.

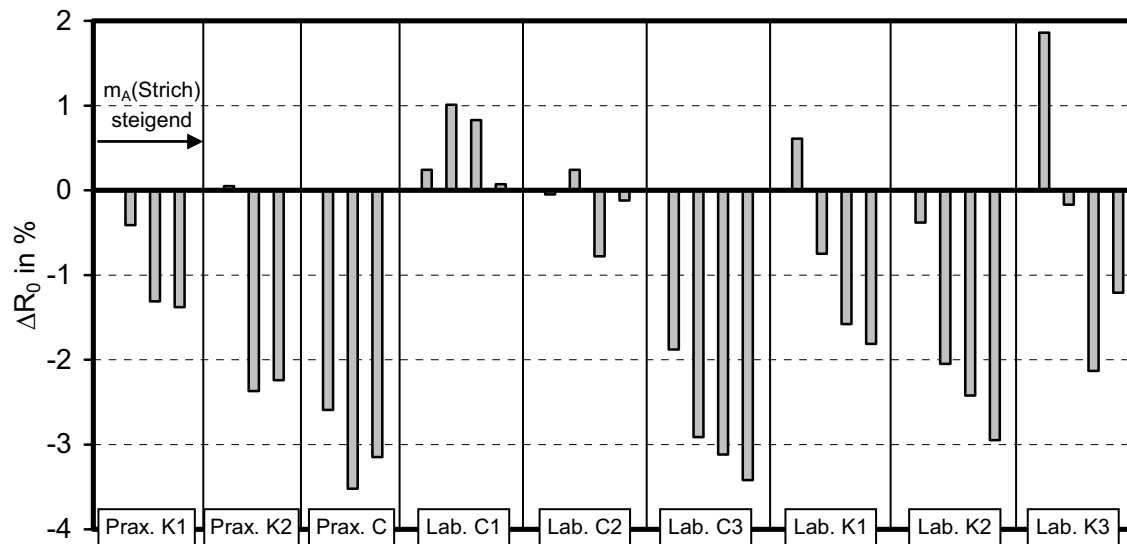


Abb. 6-6: Abweichung des Reflexionsfaktors R_0 des Modells mit vollständiger Durchtränkung bezogen auf gestrichenes Papier

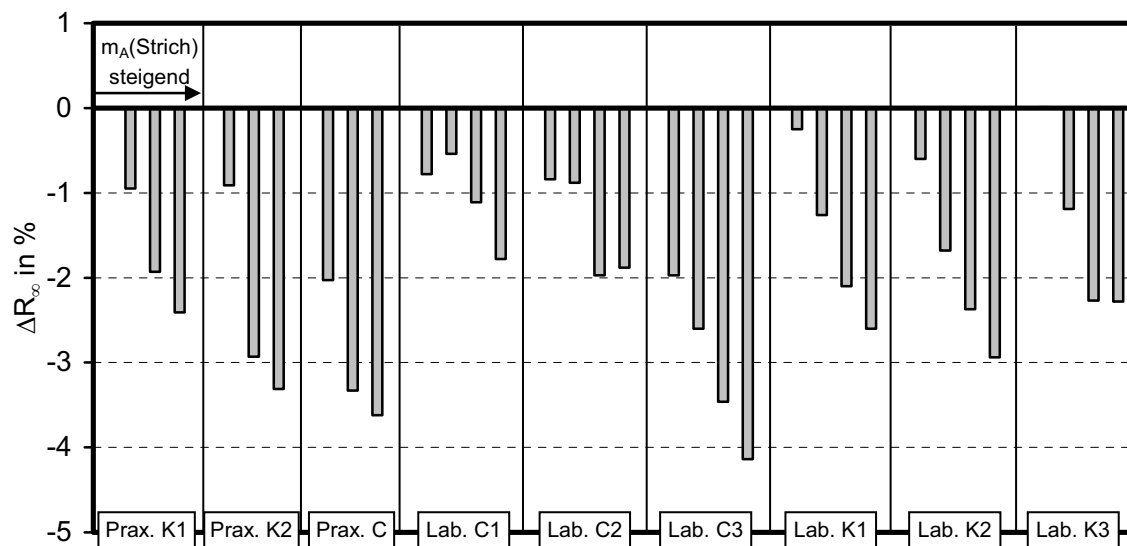


Abb. 6-7: Abweichung des Reflexionsfaktors R_∞ des Modells mit vollständiger Durchtränkung bezogen auf gestrichenes Papier

Die Abweichungen zwischen Modell und Messung sind beträchtlich. Das diesem Modell zugrunde liegende Szenario entspricht auch nicht dem gewünschten Effekt des Streichens, daher überrascht das Ergebnis nicht. Auch eine stetige Abnahme der Streichfarbkonzentration von der Blattober- zur Blattunterseite hätte zu große Fehler zur Folge. Ein weiterer Hinweis findet sich bei der Betrachtung der Porengrößenverteilung. In **Abb. 6-8** ist beispielhaft die Porengrößenverteilung des gestrichenen Papiers bei Einsatz der Praxisstreichfarbe K2 sowie der Laborstreichfarbe C2 zusammen mit der Porengrößenverteilung des Rohpapiers dargestellt.

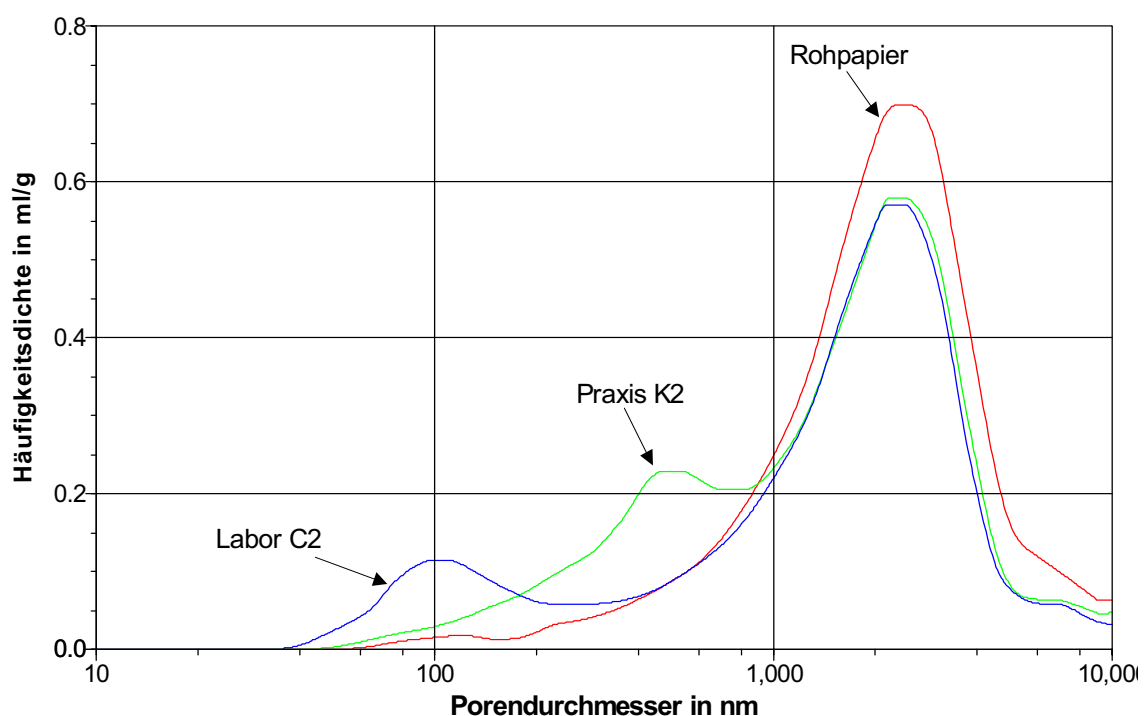


Abb. 6-8: Porengrößenverteilung des Rohpapiers sowie des gestrichenen Papiers bei Einsatz der Praxisstreichfarbe K2 (flächenbezogene Masse des Strichs: $15,0 \text{ g/m}^2$) und der Laborstreichfarbe C2 (flächenbezogene Masse des Strichs: $13,3 \text{ g/m}^2$)

Die gestrichenen Papiere lassen im Gegensatz zum Rohpapier eine bimodale Verteilung der Porengröße erkennen. Eine solche Verteilung ist typisch für ein System mit mehreren Schichten, die jeweils unterschiedliche Porenstrukturen ausbilden. Im Fall einer vollständigen Durchtränkung des Rohpapiers mit Streichfarbe ergäbe sich hingegen eine Porengrößenverteilung mit stetig abfallendem linkem Ast des Kurvenzugs ohne die Ausprägung eines zweiten Peaks. Dieser Peak wird in erster Linie von der Streichfarbe geprägt und

findet sich im Fall des mit der Laborstreichfarbe gestrichenen Papiers aufgrund der kleineren Pigmentgröße bei deutlich kleinerem Porendurchmesser. Zusammenfassend lässt sich damit feststellen, dass eine vollständige Durchtränkung des Rohpapiers sicher nicht den realen Bedingungen entspricht.

6.4.4 Zweischichtmodell mit isolierter Strichschicht

Das Zweischichtmodell fußt auf der Annahme zweier übereinander liegender getrennter Schichten. Die Streichfarbe bildet demnach eine isolierte Schicht an der Oberfläche des Rohpapiers, mithin gilt also $\mu = 0$ und $m_A'(RP) = 0$. Basierend auf (3-15) lassen sich die Werte für R_0 und R_∞ des Schichtensystems aus den optischen Kenngrößen der einzelnen Schichten berechnen. Die Werte für die untere Schicht, das Streichrohpapier, lassen sich direkt messen, während für die oben liegende Streichfarbschicht die Kenngrößen auf die in Kap. 5.9 beschriebene Weise ermittelt wurden.

Abb. 6-9 und **Abb. 6-10** zeigen die Abweichungen der Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ , die sich bei der Berechnung des Zweischichtmodells im Vergleich zu den gestrichenen Papieren ergeben.

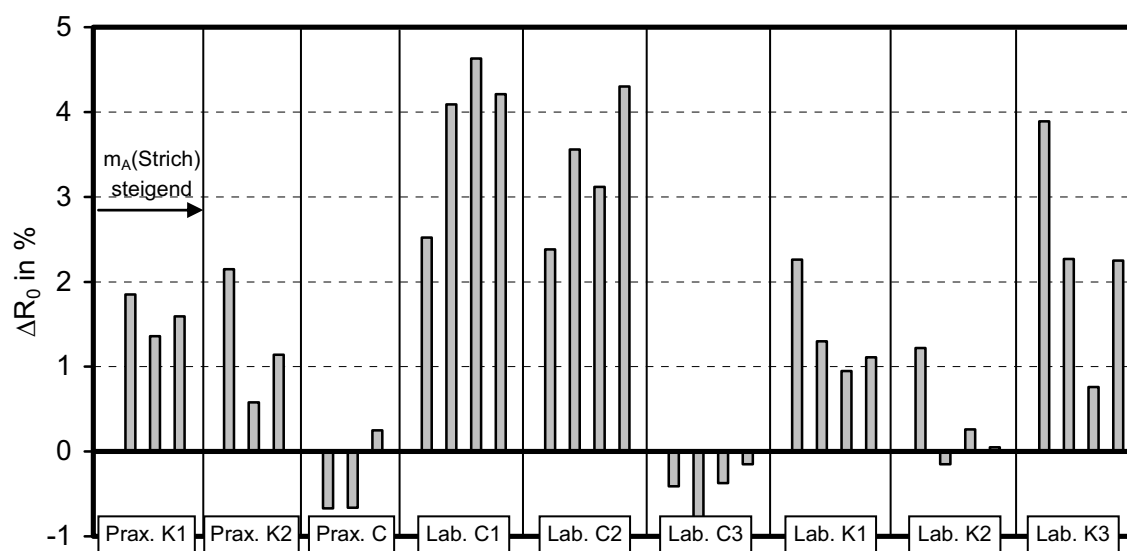


Abb. 6-9: Abweichung des Reflexionsfaktors R_0 des Zweischichtmodells mit isolierter Strichschicht bezogen auf gestrichenes Papier

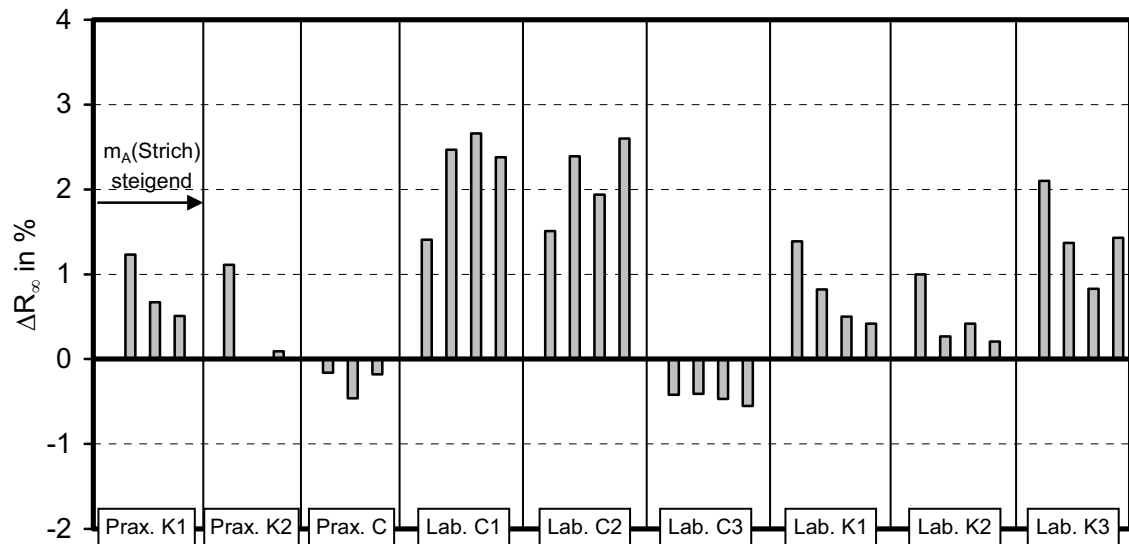


Abb. 6-10: Abweichung des Reflexionsfaktors R_∞ des Zweischichtmodells mit isolierter Strichschicht bezogen auf gestrichenes Papier

Die verschiedenen Streichfarbentypen lassen sehr unterschiedliche Differenzen erkennen. Die Praxisstreichfarbe C sowie die Laborstreichfarbe C3 zeigen nur sehr geringe Abweichungen, während die übrigen Streichfarben deutlich größere Fehler aufweisen. Offenbar können die optischen Eigenschaften der beiden genannten Streichfarben bereits durch das Zweischichtmodell mit isolierter Strichschicht angenähert werden, wohingegen die übrigen Streichfarben ein modifiziertes Modell erfordern.

6.4.5 Zweischichtmodell mit Mischschicht

Ein weiteres Zweischichtsystem ergibt sich unter der Annahme, dass die Streichfarbe komplett in das Rohpapier eindringt, dabei aber in Oberflächennähe verbleibt und somit unter der sich ausbildenden Mischschicht eine nicht von Streichfarbe benetzte Schicht des Rohpapiers stehen bleibt. Setzt man weiter voraus, dass die Mischschicht sich zu gleichen Anteilen aus Streichfarbe und Rohpapier zusammensetzt und dass beide Komponenten gleichermaßen zum Streuvermögen beitragen, ergeben sich folgende Parameter:

$$\mu = 1; \quad m'_A(\text{RP}) = m_A(\text{Streich}); \quad \alpha = \beta = \gamma = \delta = 0,5 \quad (6-18)$$

Die Abweichungen der Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ zwischen Modell und Messung sind in **Abb. 6-11** und **Abb. 6-12** zu sehen.

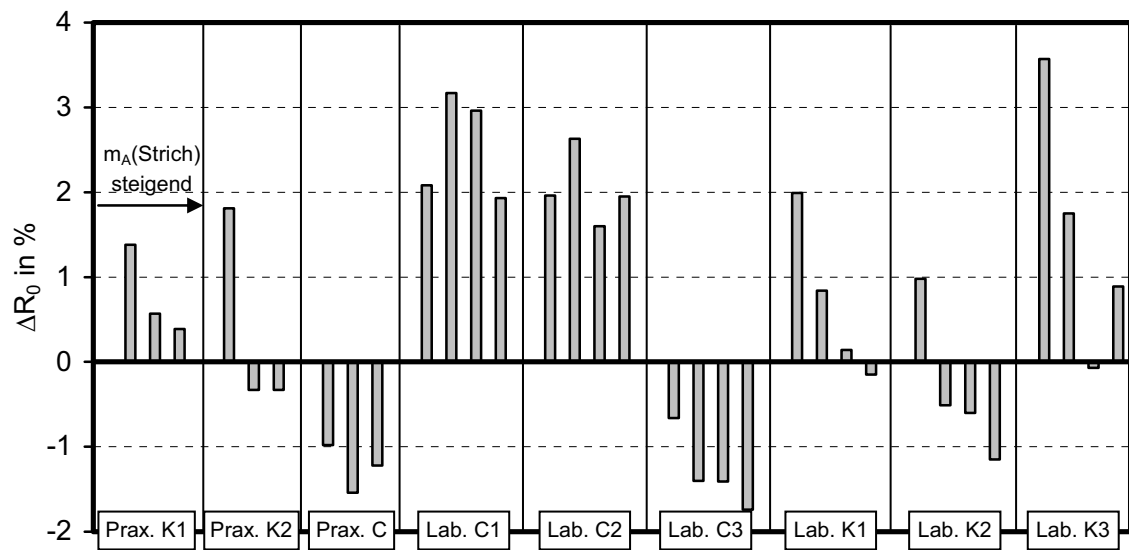


Abb. 6-11: Abweichung des Reflexionsfaktors R_0 des Zweischichtmodells mit Mischschicht bezogen auf gestrichenes Papier

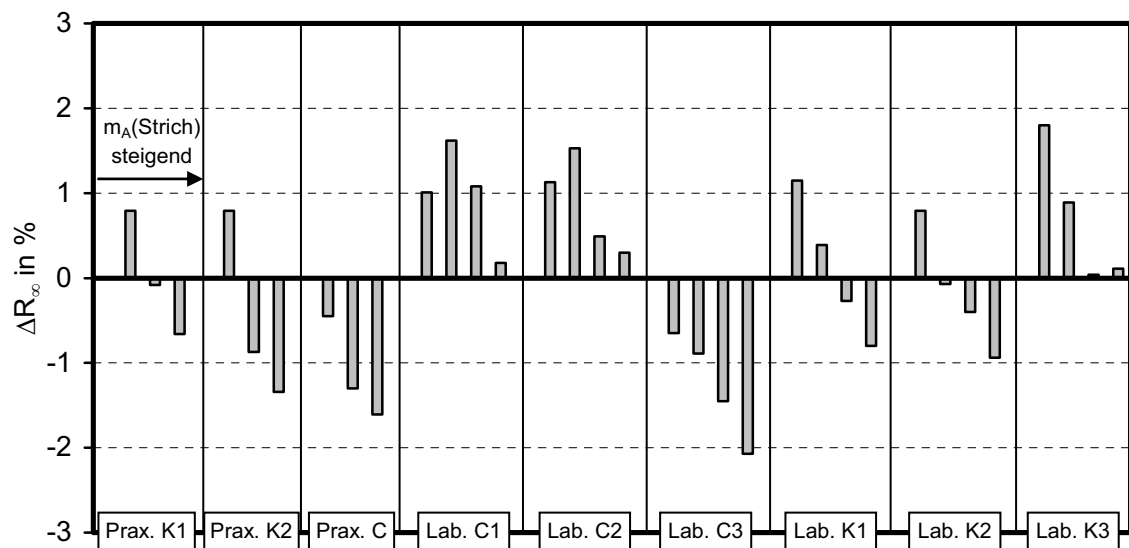


Abb. 6-12: Abweichung des Reflexionsfaktors R_∞ des Zweischichtmodells mit Mischschicht bezogen auf gestrichenes Papier

Die Annahme, dass die Streichfarbe nicht auf der Oberfläche des Papiers verbleibt, sondern zumindest anteilig ins Papier penetriert, erscheint vor dem Hintergrund der wässrigen Konsistenz der Streichfarbe sehr wahrscheinlich. Allerdings zeigen die Resultate in Abb. 6-11 und Abb. 6-12, dass das dieser Rechnung zugrunde liegende Modell aufgrund der erkennbaren Differenzen sicherlich noch angepasst werden muss.

6.4.6 Modifiziertes Zweischichtsystem mit Mischschicht

Bei der Vermischung von Streichfarbe und Rohpapier in der Mischschicht bildet sich ein Porensystem aus, das nicht ohne weiteres als Superposition der Porenstrukturen beider Komponenten betrachtet werden kann. Der Grund liegt in der Wechselwirkung zwischen den Streichfarbenbestandteilen und dem Fasernetzwerk, wodurch einige Hohlräume zwischen den Fasern gefüllt werden, während andere Poren entstehen, die in dieser Form weder in der isolierten Strichschicht noch im reinen Faserverbund zu finden sind. Da aber die Porenstruktur ein entscheidendes Kriterium für das Streuvermögen ist, muss dieser Aspekt in die Modellierung einfließen. Die folgenden **Abb. 6-13** und **Abb. 6-14** stellen der Porengrößenverteilung des gestrichenen Papiers die des Rohpapiers sowie der isolierten Strichschicht für zwei unterschiedliche Streichfarben gegenüber.

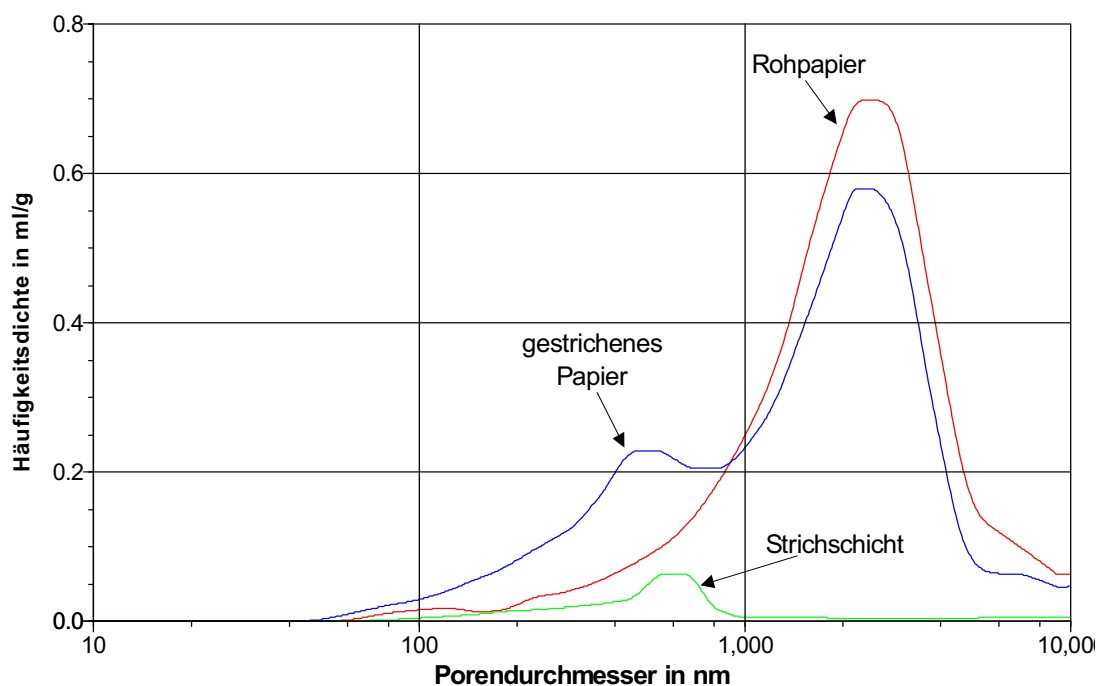


Abb. 6-13: Porengrößenverteilung des Rohpapiers sowie der isolierten Strichschicht und des gestrichenen Papiers bei Verwendung der Praxisstreichfarbe K2 (flächenbezogene Masse der Strichschicht ca. 15 g/m²)

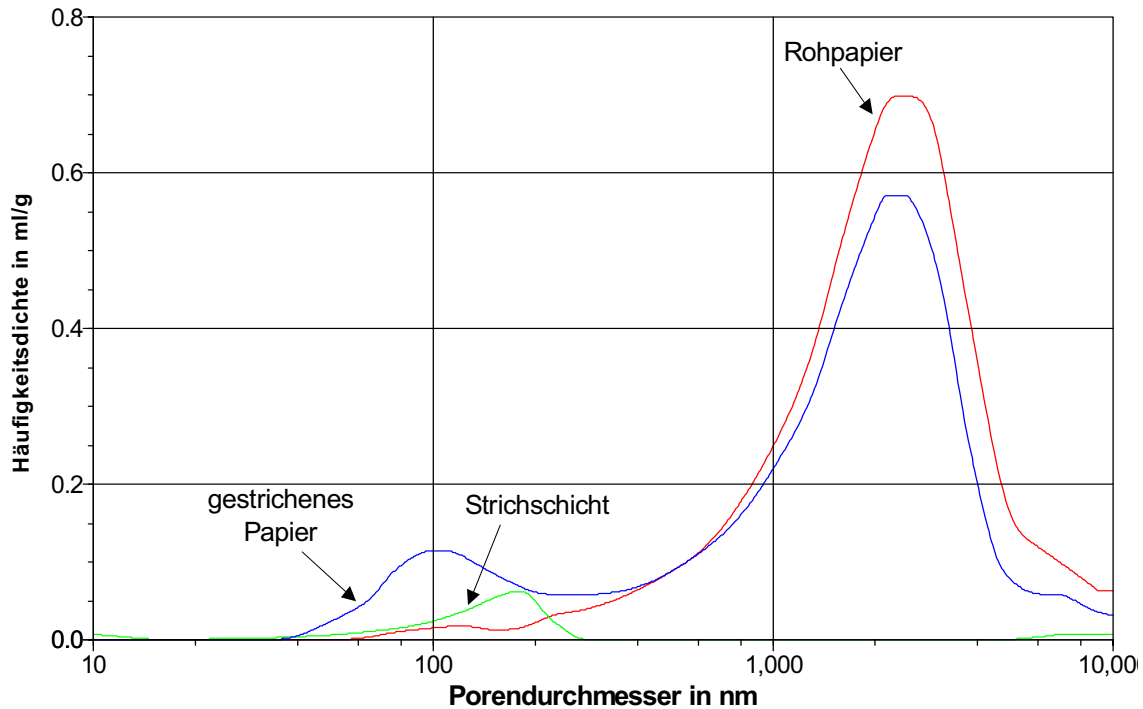


Abb. 6-14: Porengrößenverteilung des Rohpapiers sowie der isolierten Strichschicht und des gestrichenen Papiers bei Verwendung der Laborstreichfarbe C2 (flächenbezogene Masse der Strichschicht ca. 15 g/m^2)

Die Darstellungen verdeutlichen, wie sehr die durch die Streichfarbe induzierte Porenstruktur vom Trägermaterial abhängt. Im Fall einer Polyethylen-Kopierfolie mit nahezu geschlossener Oberfläche bilden sich bevorzugt Poren in einem schmalen Größenbereich aus. Kann die Streichfarbe hingegen mit dem Untergrund in Wechselwirkung treten, wie dies beim Strichauftrag auf das Rohpapier erfolgt, ergibt sich ein Porensystem, das mehr darstellt als lediglich die Summe der beiden Subsysteme Rohpapier und Strichschicht. Es entstehen aufgrund der komplexen Vorgänge während des Eindringens der Streichfarbe in das Fasernetzwerk sowie der anschließenden Trocknung neue Hohlräume, die sich in Form und Größe von den Poren der beiden Komponenten unterscheiden können. Dieser Synergieeffekt wird besonders deutlich, wenn die spezifische Porenoberfläche betrachtet wird. In **Abb. 6-15** ist zu diesem Zweck die kumulative spezifische Porenfläche der Proben aus Abb. 6-13 dargestellt. Man erkennt die vergleichsweise geringen Werte der isolierten Strichschicht. In Verbindung mit dem porösen Untergrund des Rohpapiers kann die Streichfarbe die Porenfläche aber überproportional erhöhen.

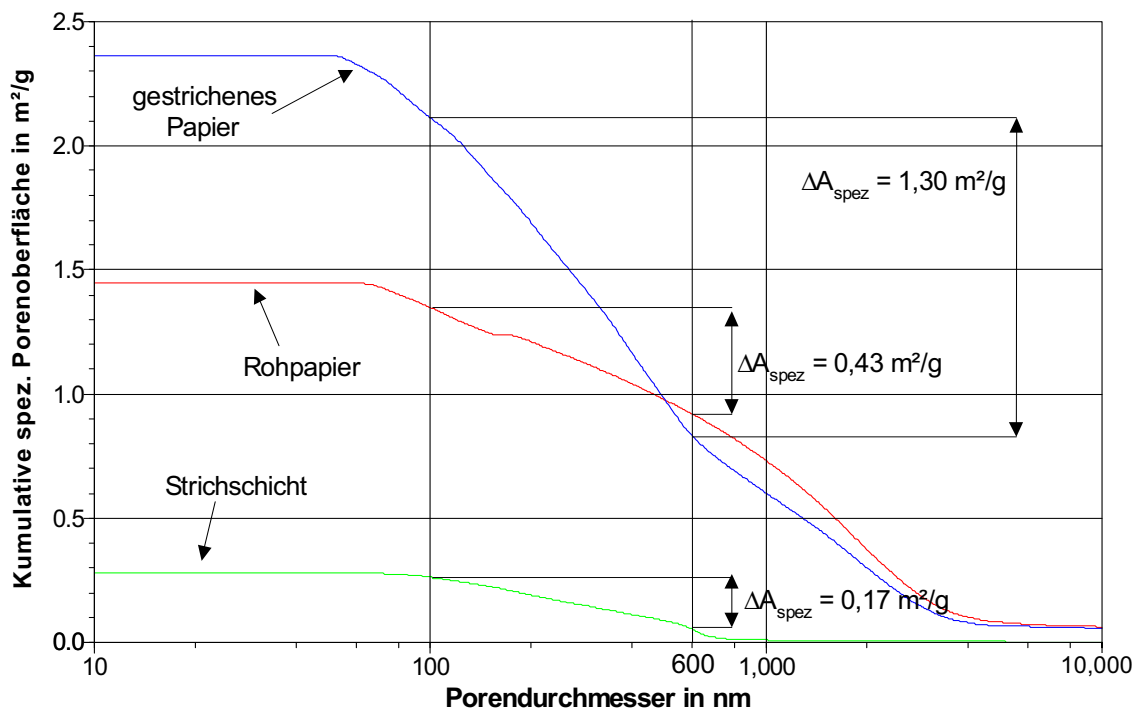


Abb. 6-15: Kumulative spezifische Porenoberfläche der isolierten Strichschicht und des gestrichenen Papiers bei Verwendung der Praxisstreichfarbe K2 (flächenbezogene Masse der Strichschicht: 15 g/m^2) mit Angabe der spezifischen Porenfläche ΔA_{spez} der Poren mit Durchmessern zwischen 100 und 600 nm

In Abb. 6-15 sind für die verschiedenen Proben die spezifischen Porenflächen der Poren im Größenbereich zwischen 100 und 600 nm eingetragen. Diese Poren tragen zur Streuung sichtbaren Lichts bei und lassen damit Rückschlüsse auf den Lichtstreuoeffizient S zu. Der Wert, der sich für ΔA_{spez} des gestrichenen Papiers ergibt, ist deutlich größer als die Summe der Porenflächen von Rohpapier und Strichschicht. Daran wird ersichtlich, dass im Zuge des Streichprozesses eine geänderte Porenstruktur generiert wird, die genau die erwünschten positiven Auswirkungen auf das Streuvermögen und somit die optische Eigenschaften hat.

Um die Veränderung der Porenstruktur in der Mischschicht zu berücksichtigen, sind die Gewichtungsfaktoren entsprechend zu wählen. Unter der Annahme, dass das Rohpapier aufgrund seines erheblich größeren Porenvolumens das Erscheinungsbild der Mischschicht stärker beeinflusst als die Streichfarbe, ist daher das Streuvermögen des Rohpapiers stärker zu gewichten. Das Absorptionsvermögen hängt dagegen von der Absorption der einzelnen Komponenten ab und berechnet sich als Summe der massengewichteten Absorptionskoeff-

fizienten von Rohpapier und Streichfarbe. Legt man eine doppelte Gewichtung des Streukoeffizienten des Rohpapiers gegenüber dem der Streichfarbe zugrunde, ergeben sich folgende Gewichtungsfaktoren:

$$\mu = 1; \quad m_A'(\text{RP}) = m_A(\text{Strich}); \quad \alpha = \frac{2}{3}; \quad \beta = \frac{1}{3}; \quad \gamma = \delta = 0,5 \quad (6-19)$$

Basierend auf diesen Annahmen ergeben sich die in **Abb. 6-16** und **Abb. 6-17** gezeigten Abweichungen zwischen Modell und Messung.

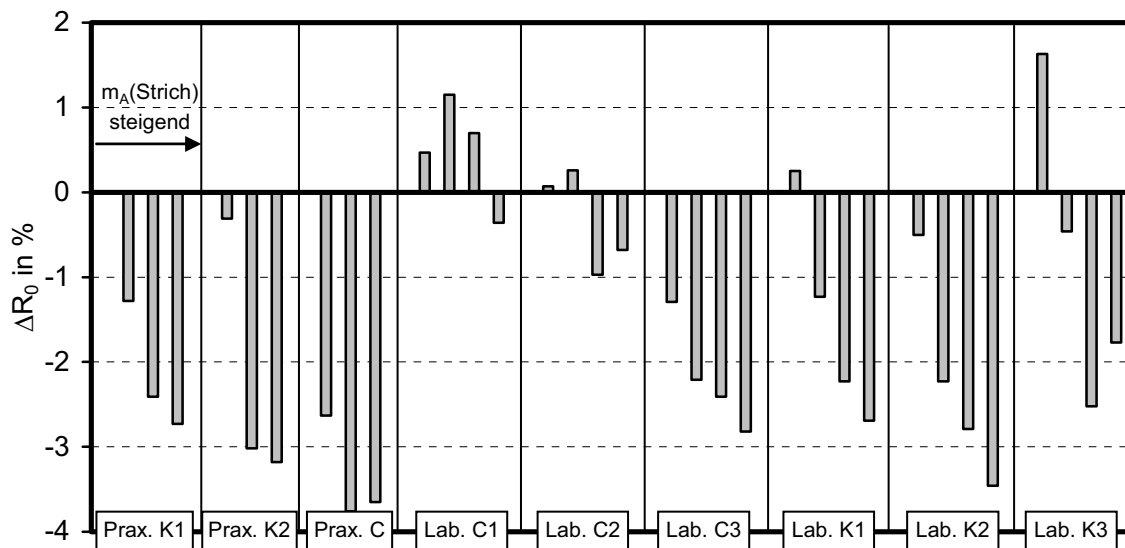


Abb. 6-16: Abweichung des Reflexionsfaktors R_0 des modifizierten Zweischichtmodells mit Mischschicht bezogen auf gestrichenes Papier

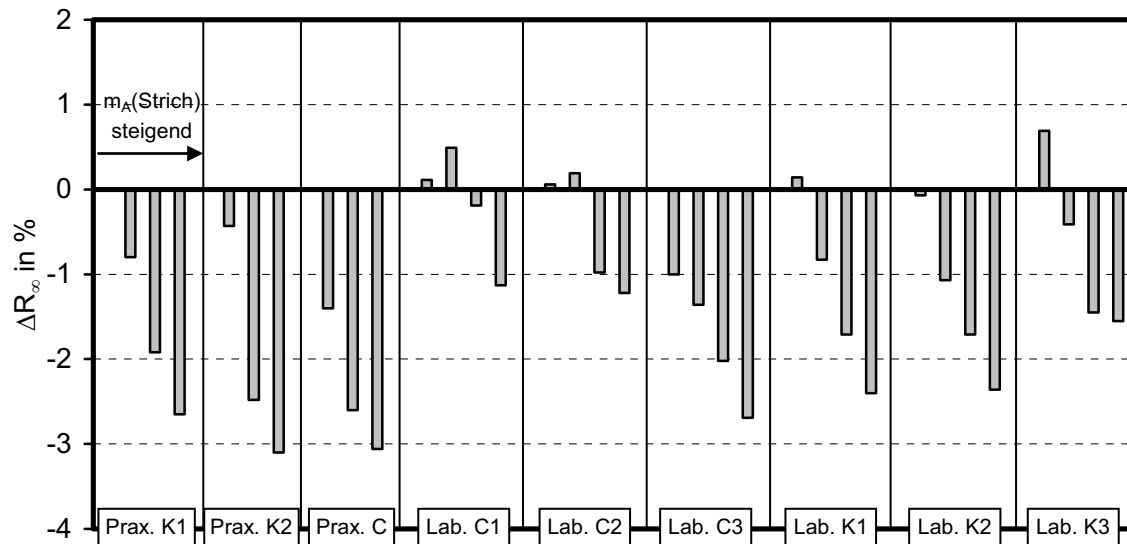


Abb. 6-17: Abweichung des Reflexionsfaktors R_∞ des modifizierten Zweischichtmodells mit Mischschicht bezogen auf gestrichenes Papier

Während die meisten Streichfarben große Differenzen erkennen lassen, zeigen die Laborstreichfarben C1 und C2 nur geringe Abweichungen der Modellrechnung gegenüber den Messwerten des gestrichenen Papiers. Je nach Zusammensetzung der Streichfarbe beschreibt offenbar ein anderes Modell die Auswirkungen des Streichprozesses auf die optischen Eigenschaften am besten.

6.4.7 Zweischichtmodell mit fixer Penetrationsschicht

Die in Kap. 6.4.5 und 6.4.6 beschriebenen Modelle gehen davon aus, dass mit zunehmendem Strichauftrag die Dicke der Rohpapierschicht, welche von Streichfarbe durchdrungen wird, ebenfalls wächst. Vorstellbar ist aber auch, dass diese Schichtdicke konstant bleibt und sich auf diese Weise die Streichfarbenkonzentration in der Mischschicht erhöht, wenn eine größere Streichfarbenmenge appliziert wird. Denkbar ist ein solches Modell unter der Voraussetzung, dass die Streichfarbenkomponenten im Rohpapier nur eine bestimmte maximale Weglänge zurücklegen können, bevor die Kapillarkräfte im Fasernetzwerk zu schwach für ein weiteres Vorankommen der Streichfarbenfront werden. In diesem Fall trüge neben der Streichfarbe eine Schicht mit definierter Dicke an der Oberseite des Rohpapiers, die Penetrationsschicht, zur Mischschicht bei, es gilt also $m_A'(RP) = \text{konst.}$

Abb. 6-18 und Abb. 6-19 zeigen zunächst die Resultate für eine fixe Penetrationsschicht von 5 g/m^2 bei vollständigem Eindringen der Streichfarbe ($\mu = 1$) sowie einer Gleichgewichtung von S und K für Rohpapier und Streichfarbe, also $\alpha = \beta = \gamma = \delta = 0,5$.

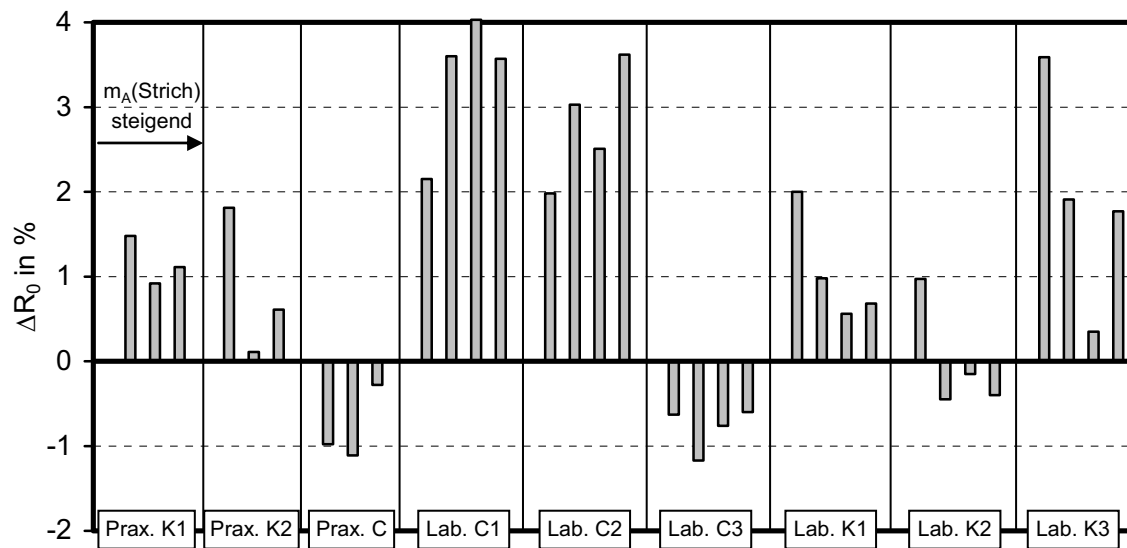


Abb. 6-18: Abweichung des Reflexionsfaktors R_0 des Zweischichtsystems mit fixer Penetrationsschicht von 5 g/m^2 bezogen auf gestrichenes Papier

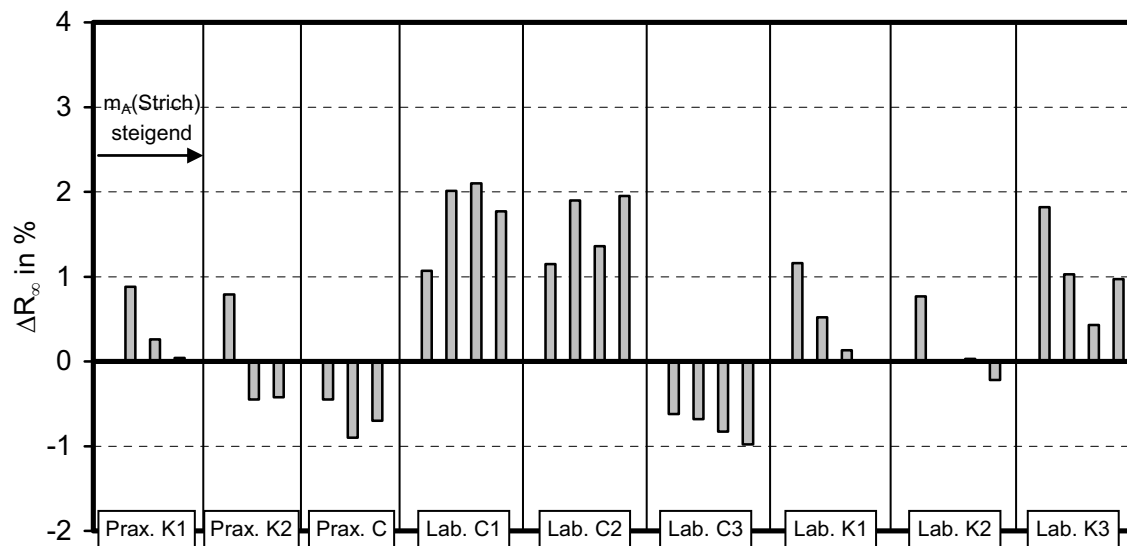


Abb. 6-19: Abweichung des Reflexionsfaktors R_∞ des Zweischichtsystems mit fixer Penetrationsschicht von 5 g/m^2 bezogen auf gestrichenes Papier

Ein Vergleich mit dem Zweischichtsystem mit Mischschicht in Kap. 6.4.5 zeigt, dass beide Modelle ähnliche Ergebnisse liefern, sodass auch der einfache Fall einer fixen Penetrationsschicht die wahren Verhältnisse nur unzureichend und nicht für alle Streichfarben gleichermaßen treffend widerspiegelt.

Ähnliche Verhältnisse ergeben sich, wenn man analog zum modifizierten Zweischichtsystem mit Mischschicht die Gewichtung von Rohpapier und Streichfarbe variiert. In **Abb. 6-20** und **Abb. 6-21** sind die Abweichungen dargestellt, die sich bei doppelter Gewichtung des Streukoeffizienten des Rohpapiers ($\alpha = \frac{2}{3}$, $\beta = \frac{1}{3}$) sowie einer Penetrationsschichtdicke von $m_A'(RP) = 10 \text{ g/m}^2$ und vollständigem Eindringen der Streichfarbe ($\mu = 1$) ergeben.

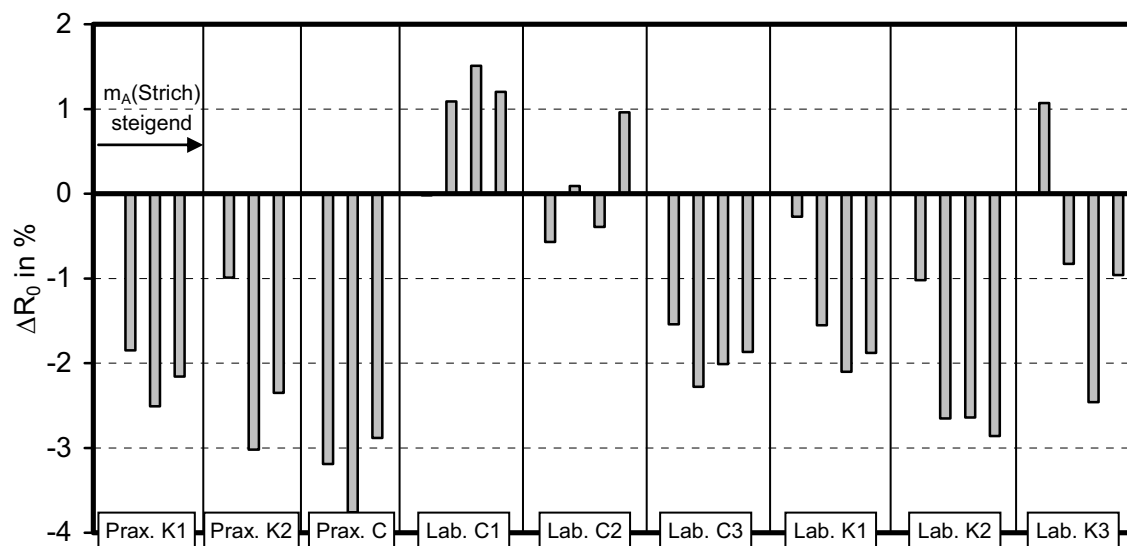


Abb. 6-20: Abweichung des Reflexionsfaktors R_0 des Zweischichtsystems mit fixer Penetrationsschicht von 10 g/m^2 und doppelter Gewichtung von S_{RP} bezogen auf gestrichenes Papier

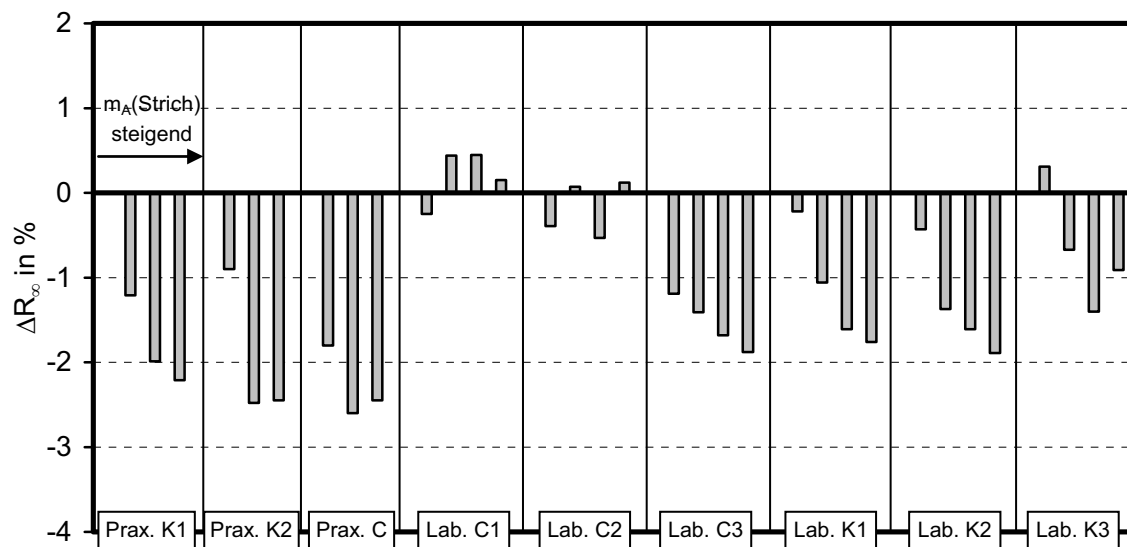


Abb. 6-21: Abweichung des Reflexionsfaktors R_∞ des Zweischichtsystems mit fixer Penetrationsschicht von 10 g/m² und doppelter Gewichtung von S_{RP} bezogen auf gestrichenes Papier

Auch hier lassen sich wieder deutliche Parallelen zum Zweischichtsystem mit Mischschicht bei doppelter Gewichtung des Streukoeffizienten des Rohpapiers erkennen. Grundsätzlich war dies auch zu erwarten, da beide Modelle von vergleichbaren Voraussetzungen ausgehen und lediglich der Anteil des Rohpapiers an der Mischschicht verändert wird. Die Fehler, die das modifizierte Zweischichtsystem mit Mischschicht bei den meisten Streichfarben aufweist, können aber auch durch ein Modell mit fixer Penetrationsschicht nicht ausgeräumt werden.

6.4.8 Dreischichtmodell mit isolierter Strichschicht und Mischschicht

Dringt nicht die gesamte Streichfarbe ins Rohpapier ein, bildet sich ein Dreischichtsystem aus. Dabei penetriert ein Teil der Streichfarbe in die oberen Bereiche des Rohpapiers, während die restliche Streichfarbe an der Oberfläche bleibt und eine separate Schicht ausbildet. Für dieses Modell gilt demnach $0 < \mu < 1$ sowie $0 < m_A'(RP) < m_A(RP)$.

Um eine Berechnung durchführen zu können, muss zunächst der genaue Aufbau der Schichten mit der Wahl der Parameter μ und $m_A'(RP)$ bestimmt werden. Unter der An-

nahme, dass die Hälfte der Streichfarbe ins Rohpapier eindringt, und dass die Mischschicht je zur Hälfte aus Streichfarbe und Papier besteht, ergeben sich folgende Werte:

$$\mu = 0,5 \quad \text{und} \quad m_A'(\text{RP}) = \frac{1}{2} m_A(\text{Strich}) \quad (6-20)$$

In **Abb. 6-22** ist der Aufbau des Schichtsystems mit der Benennung der verschiedenen Schichten dargestellt.

Strichschicht	Schicht 3: $m_A^{(3)}$
Mischschicht	Schicht 2: $m_A^{(2)}$
Rohpapier	Schicht 1: $m_A^{(1)}$

Abb. 6-22: Schematische Darstellung des Dreischichtsystems aus Rohpapier, Mischschicht und Strichschicht mit Zuordnung der flächenbezogenen Massen

Unter Berücksichtigung von (6-20) folgt für die flächenbezogenen Massen der Schichten:

$$\begin{aligned}
 m_A^{(3)} &= \frac{1}{2} m_A(\text{Strich}) \\
 m_A^{(2)} &= \frac{1}{2} m_A(\text{Strich}) + \frac{1}{2} m_A(\text{Strich}) = m_A(\text{Strich}) \\
 m_A^{(1)} &= m_A(\text{RP}) - m_A'(\text{RP}) = m_A(\text{RP}) - \frac{1}{2} m_A(\text{Strich}) \quad (6-21)
 \end{aligned}$$

Auf diese Weise werden die flächenbezogenen Massen der einzelnen Schichten auf bekannte Größen, nämlich $m_A(\text{RP})$ und $m_A(\text{Strich})$, zurückgeführt.

Im nächsten Schritt müssen die Gewichtungsfaktoren festgelegt werden. Gemäß Kap. 6.4.2.1 werden die zur Bestimmung des Absorptionsvermögens erforderlichen Faktoren γ und δ entsprechend den Massenanteilen der Komponenten gewählt. Da die Mischschicht je zur Hälfte aus Streichfarbe und Papier besteht, ergibt sich:

$$\gamma = \delta = 0,5 \quad (6-22)$$

Die Wahl der Gewichtungsfaktoren α und β orientiert sich zunächst ebenfalls an den Massenanteilen. Daher gilt:

$$\alpha = \beta = 0,5 \quad (6-23)$$

Mit den gewählten Parametern lässt sich nunmehr die Berechnung des Dreischichtsystems durchführen. Die Ergebnisse, wiederum ausgedrückt als Abweichung zum gestrichenen Papier, sind in **Abb. 6-23** und **Abb. 6-24** zu sehen.

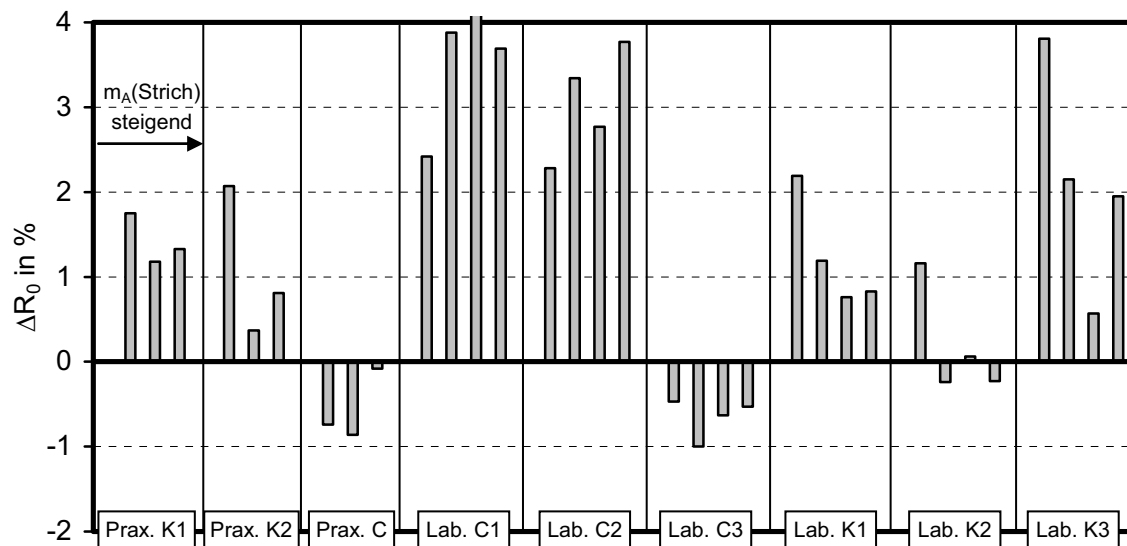


Abb. 6-23: Abweichung des Reflexionsfaktors R_0 des Dreischichtmodells bezogen auf gestrichenes Papier

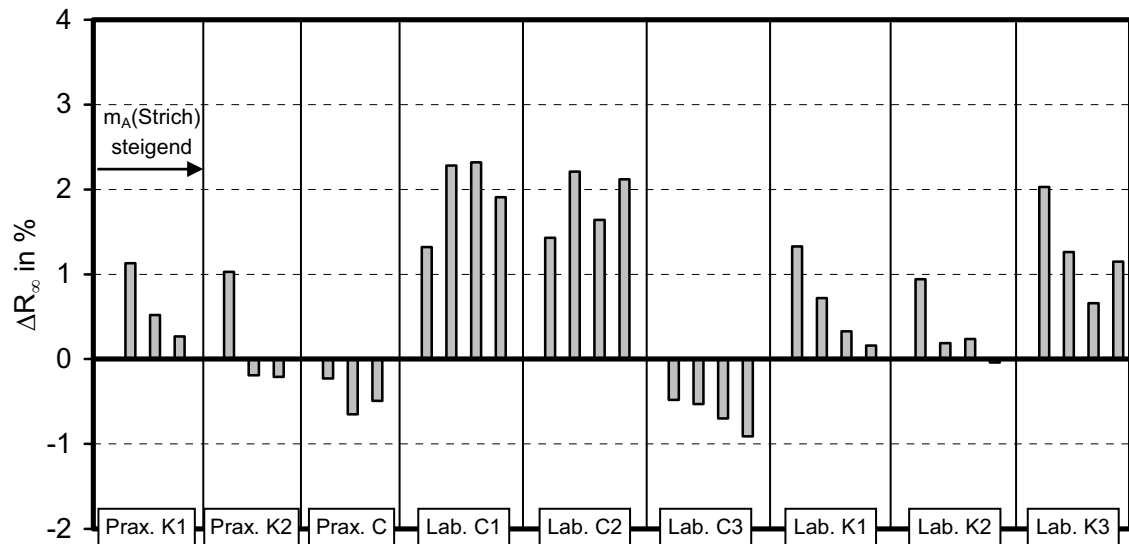


Abb. 6-24: Abweichung des Reflexionsfaktors R_∞ des Dreischichtmodells bezogen auf gestrichenes Papier

Insbesondere die Streichfarben auf Kaolinbasis zeigen im Vergleich zu den anderen Modellen geringere Abweichungen. Anscheinend führt die plättchenförmige Struktur der Kaolinpigmente eher zur Ausbildung einer an der Oberfläche verbleibenden Strichschicht, da diese Pigmente in den Kapillaren des Rohpapiers einen höheren Strömungswiderstand erfahren als die eher kugelförmigen Pigmente des Calciumcarbonats. Daher kann das Dreischichtmodell die wahren Verhältnisse eher widerspiegeln als ein Zweischichtmodell.

6.4.9 Modifiziertes Dreischichtmodell

Analog zum modifizierten Zweischichtsystem soll auch beim Dreischichtmodell noch der Fall betrachtet werden, dass die verschiedenen Komponenten der Mischschicht unterschiedlich stark zum Lichtstreuvermögen beitragen. Wie beim modifizierten Zweischichtmodell in Kap. 6.4.6 wird eine doppelte Gewichtung des Streukoeffizienten des Rohpapiers zugrunde gelegt. Damit folgt für die Variablen:

$$\mu = 1; \quad m_A'(\text{RP}) = m_A(\text{Strich}); \quad \alpha = \frac{2}{3}; \quad \beta = \frac{1}{3}; \quad \gamma = \delta = 0,5$$

$$m_A^{(3)} = \frac{1}{2} m_A(\text{Strich})$$

$$m_A^{(2)} = \frac{1}{2} m_A(\text{Strich}) + \frac{1}{2} m_A(\text{Strich}) = m_A(\text{Strich})$$

$$m_A^{(1)} = m_A(\text{RP}) - m_A'(\text{RP}) = m_A(\text{RP}) - \frac{1}{2} m_A(\text{Strich}) \quad (6-24)$$

Die Berechnungen entsprechend dem modifizierten Dreischichtmodell führen zu den in **Abb. 6-25** und **Abb. 6-26** dargestellten Resultaten.

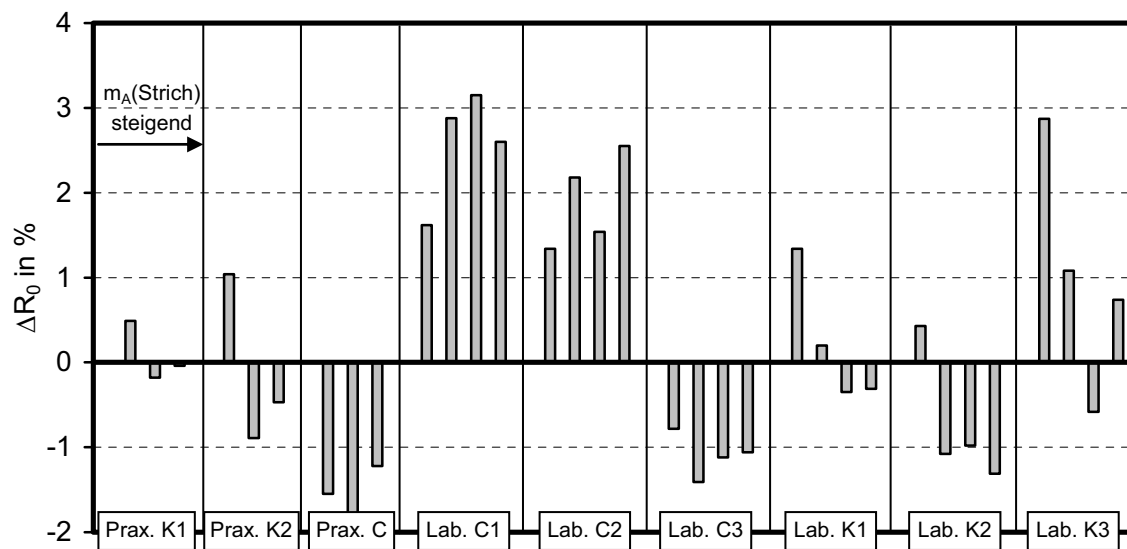


Abb. 6-25: Abweichung des Reflexionsfaktors R_0 des modifizierten Dreischichtmodells bezogen auf gestrichenes Papier

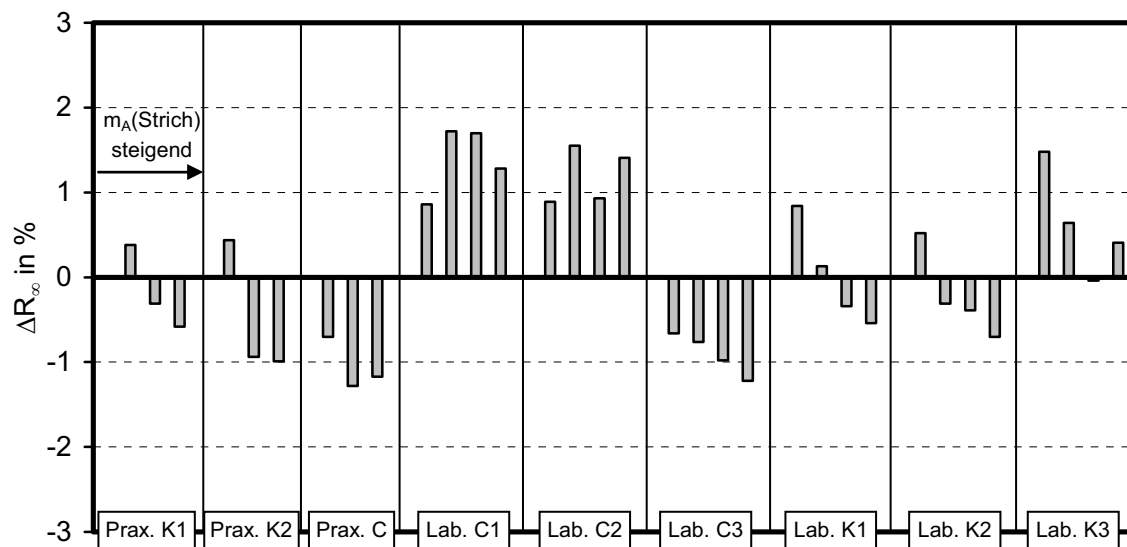


Abb. 6-26: Abweichung des Reflexionsfaktors R_∞ des modifizierten Dreischichtmodells bezogen auf gestrichenes Papier

Die Abweichungen der kaolinbasierten Streichfarben sind noch einmal geringer als beim Dreischichtmodell, sodass die Modifizierung der Gewichtung innerhalb der Mischschicht vermutlich in die richtige Richtung weist. Die calciumcarbonathaltigen Streichfarben lassen sich hingegen durch andere Modelle besser beschreiben.

6.4.10 Zusammenfassung einseitig gestrichene Papiere

Die vorangegangenen Betrachtungen haben gezeigt, dass es offenbar nicht gelingt, ein universell gültiges Modell für alle Streichfarben zu finden, da diese sich zu sehr unterscheiden. Insbesondere der Typ des Pigments scheint entscheidend für die Wahl des passenden Modells zu sein. Daher muss auf mehrere Modellansätze zurückgegriffen werden, um die gemessenen optischen Eigenschaften der gestrichenen Papiere durch die Modellierung anzunähern. **Tabelle 2** gibt einen Überblick über die Zuordnung der verschiedenen Streichfarben zum Modell mit der geringsten Abweichung zwischen Messung und Berechnung.

Tabelle 2: Zuordnung der untersuchten Streichfarben zum Modell mit der geringsten Abweichung zwischen Berechnung und Messung

Streichfarbe	Passendes Modell
Praxis C Labor C3	Zweischichtmodell mit isolierter Strichschicht
Labor C1 Labor C2	Modifiziertes Zweischichtmodell mit Mischschicht
Praxis K1 Praxis K2 Labor K1 Labor K2 Labor K3	Modifiziertes Dreischichtmodell

Die Abweichungen in den Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ , die sich bei Zugrundelegung des passenden Modells ergeben, finden sich in **Abb. 6-27** und **Abb. 6-28**.

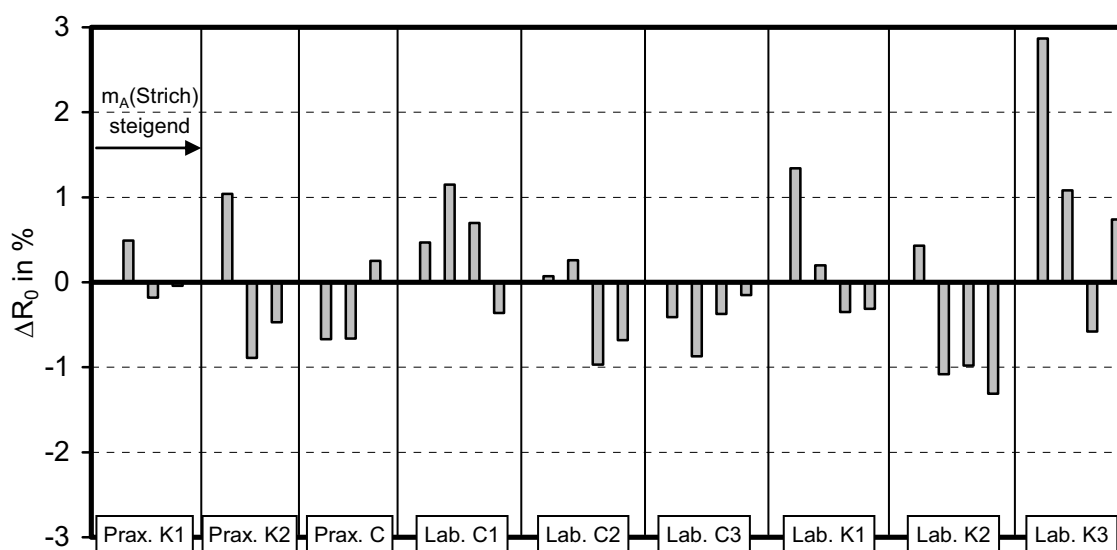


Abb. 6-27: Abweichung des Reflexionsfaktors R_0 bei Wahl des passenden Modells bezogen auf gestrichenes Papier

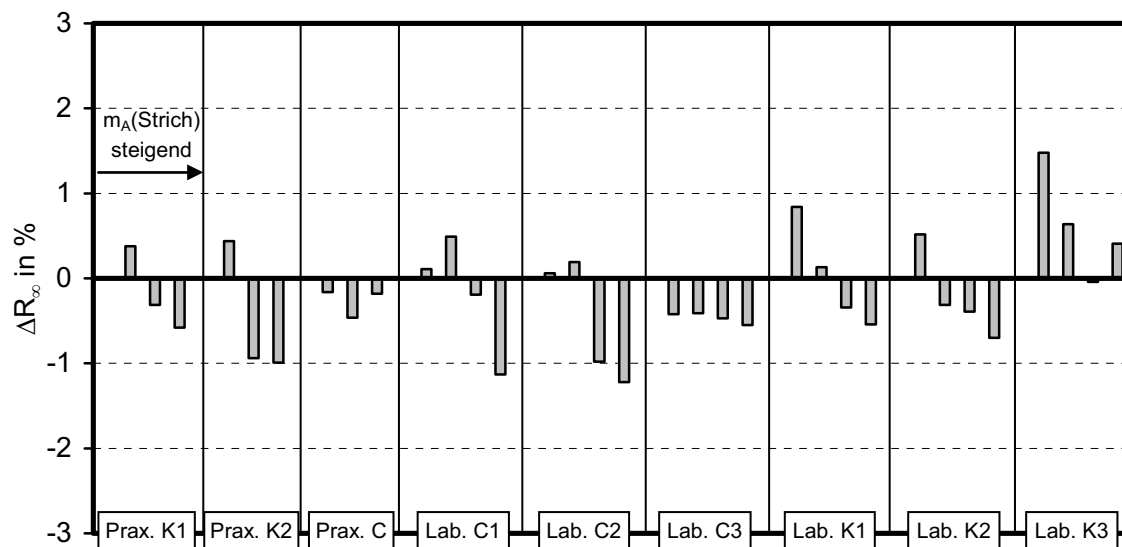


Abb. 6-28: Abweichung des Reflexionsfaktors R_∞ bei Wahl des passenden Modells bezogen auf gestrichenes Papier

Alle Streichfarben auf Kaolin-Basis lassen sich Tabelle 2 zufolge mit dem gleichen Ansatz am treffendsten modellieren. Dieses Modell geht von der Annahme aus, dass die Hälfte der applizierten Streichfarbe in den oberen Bereich des Rohpapiers eindringt und dort eine Mischschicht bildet. Die andere Hälfte der Streichfarbe verbleibt auf der Paperoberfläche und formt eine reine Strichschicht. Angesichts der Form der Pigmente erscheinen diese Annahmen nachvollziehbar, denn Kaolin weist eine plättchenförmige Struktur mit einem großen Verhältnis von Durchmesser zu Dicke auf. Beim Auftragen der Streichfarbe auf das Papier verhindert diese spezielle Form dann ein allzu tiefes Eindringen der Pigmente ins Fasernetzwerk. Daher unterbleibt eine weitergehende Durchmischung von Rohpapier und Streichfarbe mit der Folge einer Aufkonzentration der Streichfarbe an der Paperoberfläche.

Dass sich alle kaolinbasierten Streichfarben ähnlich verhalten, war nicht von vornherein zu erwarten, denn abgesehen vom Pigmenttyp unterscheiden sich die Praxisstreichfarben erheblich von den Laborstreichfarben. Die Praxisstreichfarben entstammten einer industriellen Aufbereitungsanlage und enthielten daher neben dem Bindemittel noch weitere Zusatzstoffe, die für den Einsatz in einer schnell laufenden Streichmaschine unerlässlich sind. Hierzu zählen z. B. Produkte zur Regulierung von Viskosität und Wasserrückhaltevermö-

gen, aber auch Schaumbekämpfungsmittel oder Hilfsmittel zur Verminderung des Nassabriebes [121]. Diese Streichfarben können daher im Hinblick auf ihre Wirksamkeit als optimiert betrachtet werden. Im Gegensatz dazu stellten die Laborstreichfarben sehr einfache Systeme dar, die lediglich Pigmente und Bindemittel umfassten. Trotz dieser Unterschiede in der Zusammensetzung kann jedoch das gleiche Modell zum Tragen kommen. Das lässt darauf schließen, dass nicht die zugesetzten Hilfsmittel, die zwar nur einen geringen Massenanteil im Vergleich zum Pigment stellen, aber dennoch die Eigenschaften der Streichfarbe erheblich beeinflussen können, sondern nahezu ausschließlich die Pigmente für die Ausprägung der optischen Eigenschaften verantwortlich sind.

Ein etwas anderes Bild ergibt sich beim Blick auf die Streichfarben auf Calciumcarbonatbasis. Hier können die Resultate nicht durch lediglich ein Modell erklärt werden. Die Ergebnisse der Laborstreichfarben C1 und C2 lassen sich am ehesten durch ein Modell mit einer Mischschicht aus Streichfarbe und Rohpapier deuten. Dem gegenüber steht das Verhalten der Praxisstreichfarbe C sowie der Laborstreichfarbe C3, welches auf die Ausbildung einer isolierten Strichschicht schließen lässt.

Ein Kennzeichen der Calciumcarbonate ist die nahezu sphärische Form der Pigmente, deren Durchmesser nur wenige Mikrometer beträgt. Aufgrund dieser Größe besteht im Vergleich zu Kaolin eine höhere Wahrscheinlichkeit des Eindringens ins Rohpapier. Infolgedessen erscheint es schlüssig, dass die Laborstreichfarben C1 und C2 sich am ehesten mit dem Mischschicht-Modell beschreiben lassen. Wirft man einen Blick auf Abb. 6-27 und Abb. 6-28, so weisen die Abweichungen bei niedrigen flächenbezogenen Massen des Strichauftrags auch nur eine geringe Höhe auf. Bei höheren Strichauftragsgewichten weichen die berechneten Werte aber schon deutlicher von den Messungen ab. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass bei höheren Strichgewichten das Eindringen der Streichfarbe nicht mehr ganz dem Modell folgt, sondern weniger stark ausgeprägt ist. Die Konzentration der Streichfarbe wäre in diesem Fall an der Oberfläche höher, woraus ein größerer Reflexionsfaktor resultierte als berechnet.

Die beiden anderen Streichfarben auf Calciumcarbonatbasis lassen die geringsten Abweichungen erkennen, wenn das Zweischichtmodell mit isolierter Strichschicht gewählt wird. Das ließe sich nach dem oben Gesagten nicht ohne weiteres erwarten und bedarf daher einer genaueren Betrachtung.

Die Laborstreichfarbe C3 zeigt bei vergleichbarem Strichgewicht die geringste Verbesserung der optischen Eigenschaften aller untersuchten Streichfarben. Die Ursache liegt, wie **Abb. 6-29** zeigt, in der ungünstigen Porengrößenverteilung, die sich im gestrichenen Papier ausbildet.

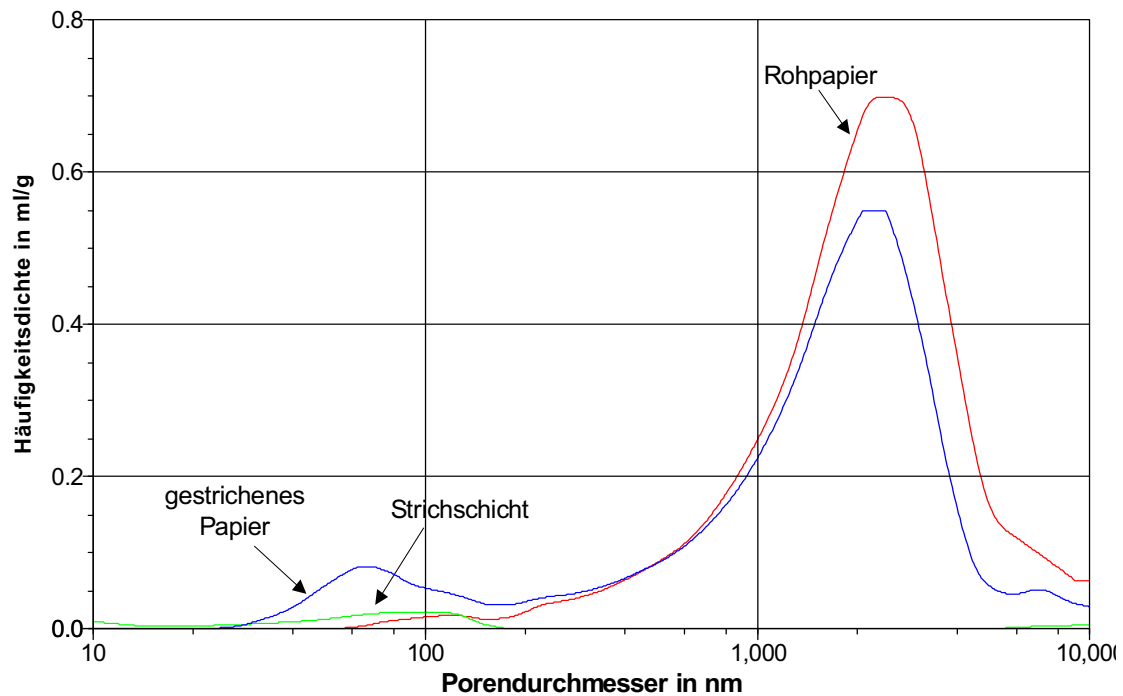


Abb. 6-29: Porengrößenverteilung des Rohpapiers sowie der isolierten Strichschicht und des gestrichenen Papiers bei Verwendung der Laborstreichfarbe C3 (flächenbezogene Masse der Strichschicht ca. 15 g/m²)

Bedingt durch die geringe Teilchengröße der Pigmente dieser Streichfarbe wird eine Porenstruktur mit sehr kleinen Poren geschaffen, deren Häufigkeitsmaximum bei weniger als 100 nm liegt. Der Zugewinn an Porenfläche im wichtigen Größenbereich zwischen 100 und 600 nm ist nur marginal, worauf die geringe Wirksamkeit dieser Streichfarbe bezüglich der optischen Eigenschaften zurückzuführen ist. Anhand Abb. 6-29 wird auch ersichtlich, warum der Streukoeffizient bei dieser Streichfarbe erheblich niedriger ausfällt als bei allen anderen. Die geringe Partikelgröße ermöglicht in der Strichschicht eine hohe Packungsdichte der Pigmente, die mit einem geringen Hohlraumvolumen und sehr kleinen Poren einhergeht. Wird diese Streichfarbe nun auf das Rohpapier aufgetragen, dann werden die Pigmente wahrscheinlich nicht, wie das Modell nahe legt, eine isolierte Strich-

schicht ausbilden, sondern im Gegenteil sehr leicht ins Papier eindringen können. Möglicherweise wird sich ähnlich wie bei den Laborstreichfarben C1 und C2 eine Mischschicht bilden, deren optische Eigenschaften dann aber nicht auf dieselbe Weise beschrieben werden können. Es ist vielmehr zu vermuten, dass durch die Wechselwirkung der kleinen Pigmente mit dem Fasernetzwerk eine Struktur geschaffen wird, dessen Streuvermögen höher liegt als das der beiden Einzelkomponenten. Dadurch entsteht der Eindruck, als könnte das gestrichene Papier nur durch das Modell mit isolierter Strichschicht, bei dem der Strich seinen maximalen optischen Wirkungsgrad entfalten kann, angemessen nachgestellt werden. Tatsächlich handelte es sich aber wie bei den beiden anderen Laborstreichfarben auch um ein System mit einer Mischschicht, deren Streuvermögen lediglich höher liegt als vom Modell kalkuliert. Die Unterstellung eines falschen Modells ist demzufolge auf eine unzureichende Kenntnis der Vorgänge in der Durchdringungszone von Rohpapier und Streichfarbe zurückzuführen.

Die sehr geringe Partikelgröße der Laborstreichfarbe C3 mit einem hohen Anteil von Pigmenten mit einem Durchmesser von weniger als $1\text{ }\mu\text{m}$ führt also dazu, dass sich dieses System einer korrekten Modellierung weitgehend entzieht. Um die Resultate zu deuten, müssten gewisse Annahmen getroffen werden, die nicht direkt belegbar sind.

Festzuhalten bleibt schließlich, dass das Pigment dieser Streichfarbe in der Regel erst im Deckstrich eingesetzt wird und damit auf eine Oberfläche trifft, deren Poren durch den Vorstrich partiell geschlossen sind. Auf diese Weise kann die geringe Partikelgröße zum Tragen kommen, da Unebenheiten im Vorstrich egalisiert werden

Die Praxisstreichfarbe C zeigt ein Verhalten mit einem gewissen Spielraum der Interpretation. Zwar sind die geringsten Abweichungen zwischen Messung und Berechnung mit dem Zweischichtmodell mit isolierter Strichschicht zu erkennen, aber auch das Dreischichtmodell mit zwischengelagerter Mischschicht weist nur wenig größere Fehler auf. Von vergleichbarer Größenordnung werden die Differenzen bei Annahme eines Zweischichtsystems mit Mischschicht, wenn die Gewichtung des Streukoeffizienten der Streichfarbe in der Mischschicht die des Rohpapiers übersteigt. Es darf daher vermutet werden, dass sich ein Schichtensystem ausbildet, welches durch keines der Modelle korrekt beschrieben wird, aber von allen in gleichem Maß angenähert wird.

In **Abb. 6-30** ist ein Ausschnitt aus der optischen Zustandsebene dargestellt, die in Anhang B detailliert beschrieben wird. Eingetragen sind als ausgefüllte Symbole die Werte der gestrichenen Papiere, die mit den verschiedenen Streichfarben bei einem Auftragsgewicht von etwa 10 g/m^2 gestrichen wurden. Die korrespondierenden Werte der Modellrechnung sind als offene Symbole zu erkennen und mit den zugeordneten Messwerten verbunden.

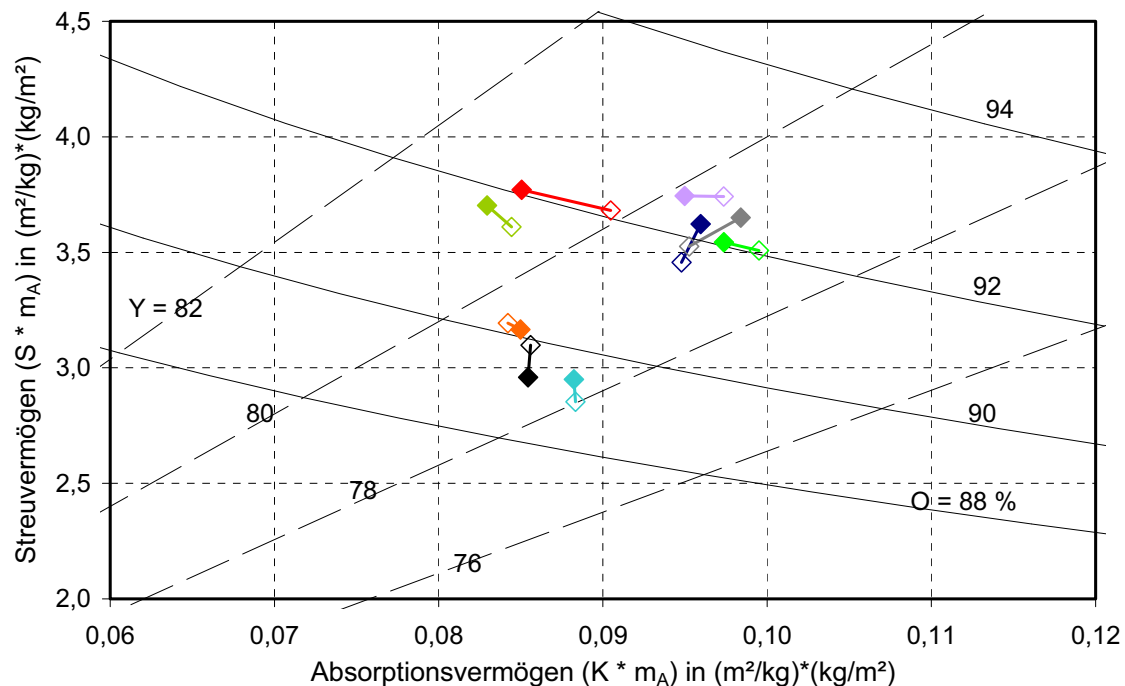


Abb. 6-30: Lage der gestrichenen Papiere (ausgefüllte Symbole) sowie der Ergebnisse der Modellrechnungen (offene Symbole) in der optischen Zustandsebene (flächenbezogene Masse des Strichauftrags ca. 10 g/m^2)

Trotz der in Kap. 6.3 beschriebenen Problematik der Fehlerfortpflanzung bei der Berechnung der Kubelka-Munk-Koeffizienten S und K wird anhand Abb. 6-30 deutlich, dass die Messungen durch die Modellierung sehr gut angenähert werden. Die in dieser Darstellung gewählte Strichauftragsmenge von etwa 10 g/m^2 ist die übliche Größenordnung bei der Produktion von LWC-Papier, daher sollten die Modelle insbesondere in diesem Flächenmassebereich eine gute Übereinstimmung zeigen. Die Differenzen zwischen Modell und Messung betragen in diesem auch nur wenige Prozent, sodass die Modellierung als erfolgreich erachtet werden kann.

6.5 Beidseitig gestrichene Papiere

6.5.1 Allgemeine Bemerkungen

LWC-Papiere werden in der Regel beidseitig gestrichen. Eine Modellierung der optischen Eigenschaften sollte daher auch für beidseitig gestrichene Papiere gelten. Grundsätzlich kann bei diesen Papieren von einem symmetrischen Blattaufbau ausgegangen werden, sofern die Streichfarbenapplikation auf Ober- und Unterseite auf dieselbe Art erfolgt. In diesem Fall tritt die Streichfarbe mit dem Rohpapier an beiden Seiten in gleicher Weise in Wechselwirkung, sodass die Modelle, die für die einseitig gestrichenen Proben gefunden wurden, auch für beidseitig gestrichenes Papier anwendbar sein sollten. Die Betrachtungen beschränken sich demzufolge weitgehend auf jene Modelle, welche den Messungen am nächsten kommen.

Im Folgenden werden daher die Ergebnisse der in Kap. 6.4 für einseitig gestrichene Papiere ermittelten und nun auf beidseitig gestrichene Proben übertragenen Modelle dargestellt. Die Bezeichnung des jeweiligen Modells wird dabei von den einseitig gestrichenen Papieren übernommen, um die Analogie der Modellbildung zu verdeutlichen.

Als Bezugsgröße für die Beurteilung der Modelle dienen wiederum die gemessenen Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ der gestrichenen Papiere. In Tabelle 3 sind diese Größen zusammen mit der aufgetragenen Streichfarbenmenge sowie den berechneten Kubelka-Munk-Koeffizienten aufgelistet. Auffällig sind die bei vergleichbarer Strichauftragsmenge merklich höheren Streukoeffizienten der mit den Praxisstreichfarben gestrichenen Papiere verglichen mit den Laborstreichfarben. Dies deutet darauf hin, dass die größte optische Wirkung der verwendeten Pigmente nur in Verbindung mit einer optimierten Streichfarbenrezeptur erreicht werden kann. Während die Praxisstreichfarben aufgrund der zugefügten Hilfsmittel diese Voraussetzung vermutlich erfüllen, weisen die Laborstreichfarben hier prinzipbedingt Defizite auf.

Tabelle 3: Applizierte Streichfarbenmenge, Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ , dichtebezogener Lichtstreuoeffizient S und dichtebezogener Lichtabsorptionskoeffizient K der beidseitig gestrichenen Papiere

Streichfarbe	Flächenbezogene Masse des Strichs g/m ² /Seite	R_0 %	R_∞ %	S m ² /kg	K m ² /kg
Praxis K1	6,3	73,96	78,76	72,44	2,07
	9,4	76,92	80,32	81,28	1,96
	13,4	79,00	81,46	86,19	1,82
Praxis K2	5,0	71,23	78,20	61,47	1,87
	10,0	77,32	81,31	77,68	1,67
	15,0	79,95	82,75	83,41	1,50
Praxis C	5,0	72,19	78,91	64,51	1,82
	10,0	77,27	81,48	76,39	1,61
	15,0	79,60	82,77	79,24	1,42
Labor C1	5,9	69,91	77,82	54,55	1,72
	9,6	72,52	79,16	55,82	1,53
	15,1	75,87	80,96	58,61	1,31
	19,9	78,23	82,19	61,63	1,19
Labor C2	5,3	70,85	78,27	58,89	1,78
	9,0	73,69	80,03	60,54	1,51
	13,3	77,48	81,85	69,09	1,39
	19,4	79,73	83,10	70,03	1,20
Labor C3	5,8	69,45	77,42	53,70	1,77
	9,1	71,92	78,64	55,22	1,60
	14,5	74,81	80,20	56,07	1,37
	20,0	76,45	81,28	53,77	1,16
Labor K1	5,1	69,66	76,66	57,51	2,04
	7,3	72,34	77,81	63,12	2,00
	11,0	75,25	79,12	69,32	1,91
	16,0	77,46	80,21	72,50	1,77
Labor K2	4,6	70,01	77,02	59,38	2,03
	6,1	72,43	78,04	65,66	2,03
	11,1	75,40	79,43	68,79	1,83
	14,5	78,08	80,82	77,78	1,77
Labor K3	5,3	70,13	77,02	58,37	2,00
	7,3	72,93	78,19	65,37	1,99
	10,4	75,82	79,44	73,68	1,96
	15,5	77,76	80,35	75,65	1,82

6.5.2 Zweischichtmodell mit isolierten Strichschichten

Grundlage dieses Modells ist die Vorstellung zweier isolierter Strichschichten, die auf beiden Seiten das Papier bedecken, ohne dass eine Vermischung von Streichfarbe und Rohpapier auftritt.

Die Ergebnisse der Modellrechnung, ausgedrückt als prozentuale Abweichung der Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ der Berechnung in Bezug auf das beidseitig gestrichene Papier, sind in **Abb. 6-31** und **Abb. 6-32** zu sehen.

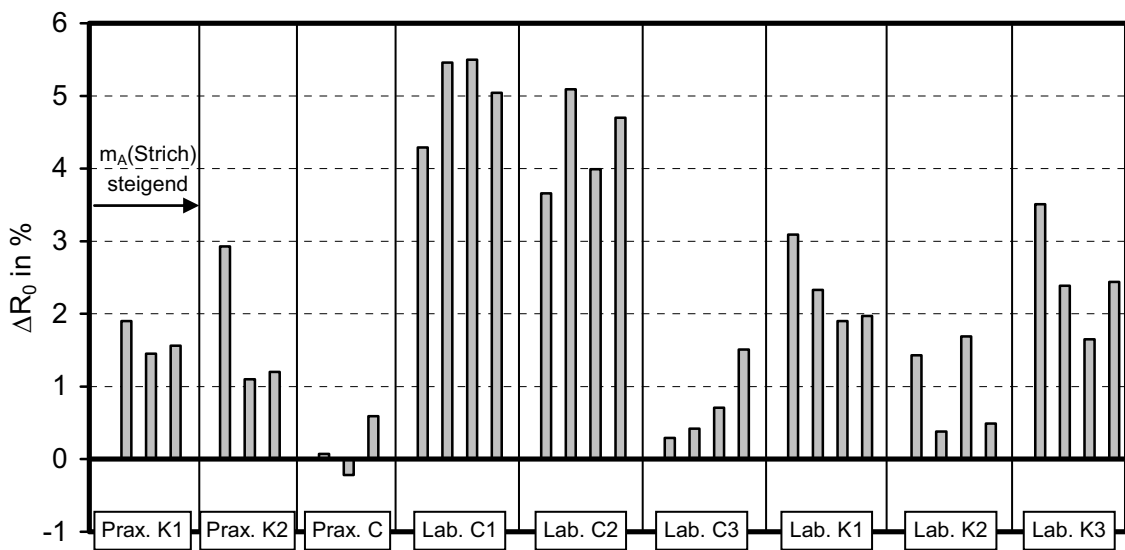


Abb. 6-31: Abweichung des Reflexionsfaktors R_0 des Zweischichtmodells mit isolierten Strichschichten bezogen auf beidseitig gestrichenes Papier

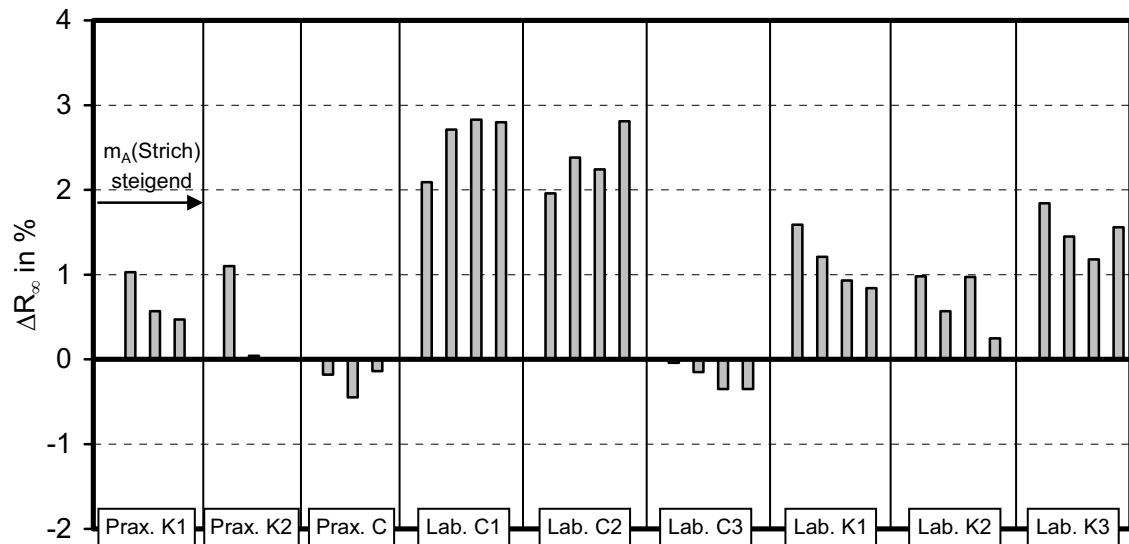


Abb. 6-32: Abweichung des Reflexionsfaktors R_∞ des Zweischichtmodells mit isolierten Strichschichten bezogen auf beidseitig gestrichenes Papier

Wie bei den einseitig gestrichenen Papieren beschreibt dieses Modell die optischen Eigenschaften der Proben unter Verwendung der Praxisstreichfarbe C sowie der Laborstreichfarbe C3 mit den geringsten Fehlern. Allerdings sind auch hier die in Kap. 6.4.10 abgeleiteten Aussagen zur Wechselwirkung dieser Streichfarben mit dem Rohpapier zu beachten, so dass das Modell mit isolierten Strichschichten die Resultate lediglich phänomenologisch, nicht aber hinsichtlich der tatsächlich sich ausbildenden Schichtung erklären kann.

6.5.3 Modifiziertes Zweischichtsystem mit Mischschichten

Analog dem in Kap. 6.4.6 dargelegten Modell eines Systems mit einer Mischschicht aus Rohpapier und eingedrungener Streichfarbe zeigen **Abb. 6-33** und **Abb. 6-34** die Resultate für beidseitig gestrichene Papiere. Zugrunde gelegt wurden die gleichen Gewichtungsfaktoren wie bei den einseitig gestrichenen Proben.

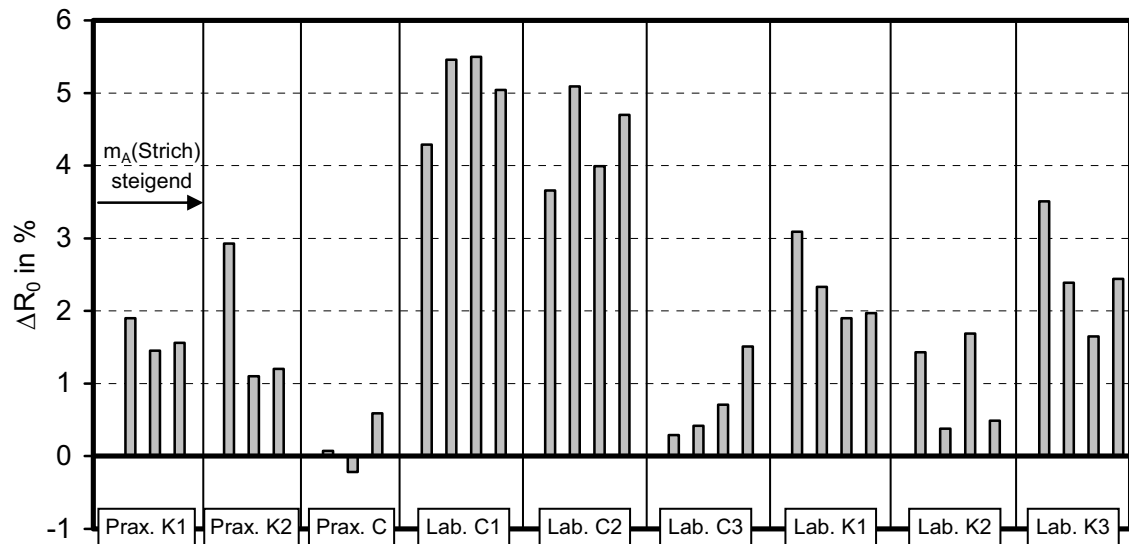


Abb. 6-33: Abweichung des Reflexionsfaktors R_0 des modifizierten Zweischichtmodells mit Mischschichten bezogen auf beidseitig gestrichenes Papier

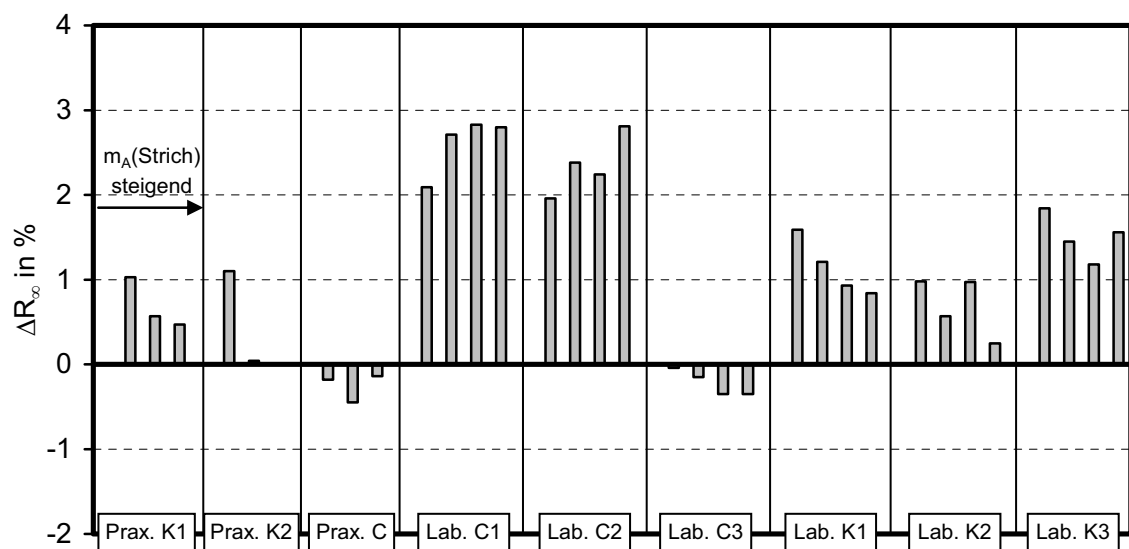


Abb. 6-34: Abweichung des Reflexionsfaktors R_0 des modifizierten Zweischichtmodells mit Mischschichten bezogen auf beidseitig gestrichenes Papier

Eine durchgängig nicht zu große Abweichung zeigt sich analog zu den einseitig gestrichenen Papieren lediglich bei den Laborstreichfarben C1 und C2, während die übrigen Streichfarben mitunter deutliche Differenzen erkennen lassen. Die Fehler im Reflexionsfaktor R_0 sind hingegen etwas höher als bei einseitig gestrichenem Papier, was die in

Kap. 6.4.10 abgeleiteten Schlussfolgerungen zum Konzentrationsgefälle der Laborstreichfarben C1 und C2 zu bestätigen scheint. Die daraus folgende zu erwartende Erhöhung des Reflexionsfaktors wäre demnach, wie hier auch zu beobachten ist, für R_0 ausgeprägter als für R_∞ . Dies ergibt sich aus dem Einfluss des Schichtaufbaus sowie den daraus resultierenden Lichtströmen im Papier.

Legt man wie beim modifizierten Zweischichtmodell eine konstante Streichfarbendkonzentration innerhalb der Mischschicht zugrunde, kann das Licht tiefer in das Papier eindringen, als wenn die Konzentration der Streichfarbe an der Oberfläche der Mischschicht am höchsten ist und nach unten abnimmt. Da die Streichfarbe einen höheren Streukoeffizienten aufweist als das Rohpapier, wird im zweiten Fall das Licht in den oberen Bereichen stärker gestreut, woraus letztendlich ein höherer Wert für R_0 resultiert. Demzufolge ist auch ein größeres R_∞ zu erwarten. Allerdings fällt die Differenz für diesen Reflexionsfaktor nicht so groß aus, weil das durch das oberste Papierblatt tretende Licht von den darunter befindlichen Schichten teilweise wieder nach oben reflektiert und so die Unterschiede nivelliert werden. Die Schlüsse aus Kap. 6.4.10 werden damit untermauert.

6.5.4 Modifiziertes Dreischichtsystem

Schließlich folgt eine Betrachtung des Modells, das auf der Annahme einer Mischschicht sowie darüber liegenden Schicht aus reiner Streichfarbe beruht und im Fall der einseitig gestrichenen Papiere die Streichfarben auf Kaolinbasis am besten beschreiben kann. Wie **Abb. 6-35** und **Abb. 6-36** zeigen, sind auch bei den beidseitig gestrichenen Papieren die Abweichungen zwischen Modell und Messung nur gering.

Damit können die in Kap. 6.4.8 und 6.4.9 getroffenen Annahmen in Bezug auf das Eindringverhalten der kaolinhaltigen Streichfarben mit dem Postulat einer reinen Streichfarbensschicht gestützt werden.

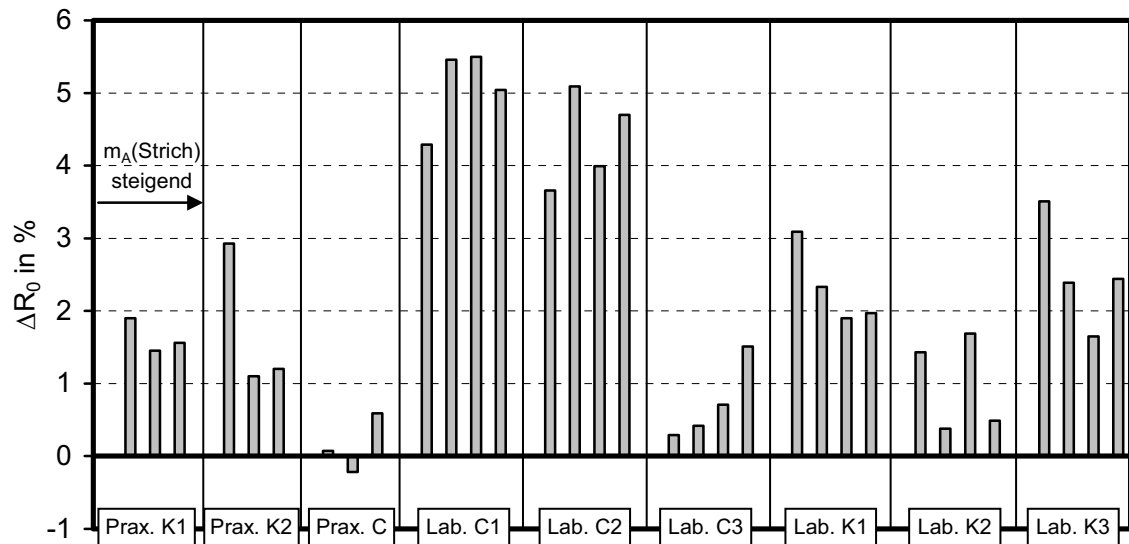


Abb. 6-35: Abweichung des Reflexionsfaktors R_0 des modifizierten Dreischichtmodells mit Misch- und Streichfarbenschichten bezogen auf beidseitig gestrichenes Papier

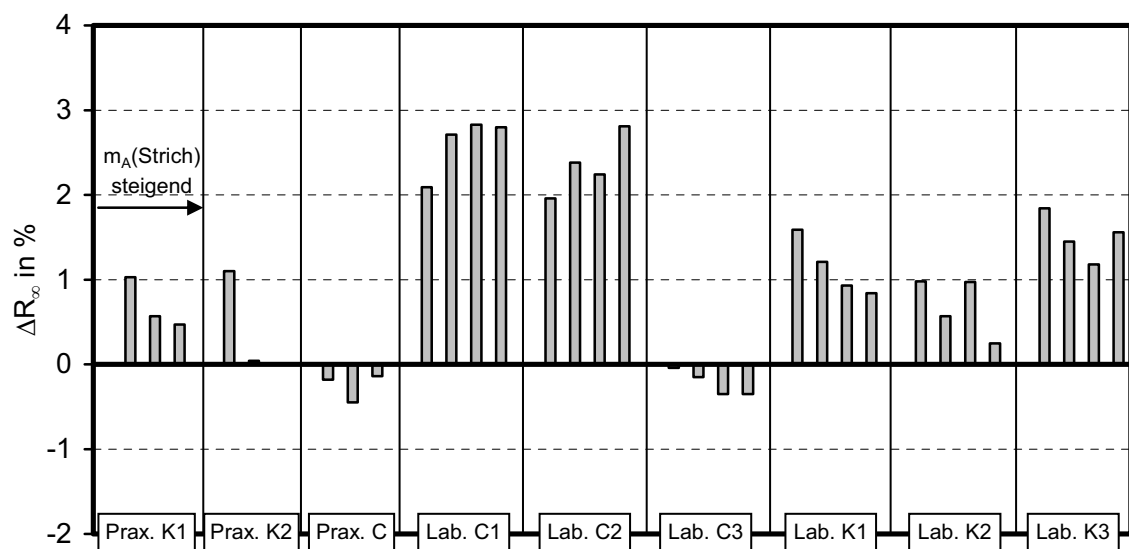


Abb. 6-36: Abweichung des Reflexionsfaktors R_∞ des modifizierten Dreischichtmodells mit Misch- und Streichfarbenschichten bezogen auf beidseitig gestrichenes Papier

6.5.5 Zusammenfassung beidseitig gestrichene Papiere

Werden die Ergebnisse der Modelle mit den jeweils geringsten Fehlern zusammengefasst, ergeben sich die in **Abb. 6-37** und **Abb. 6-38** gezeigten Differenzen. Die zugrunde liegenden Modelle sind dabei die gleichen wie die in Tabelle 2 für einseitig gestrichene Papiere

aufgelisteten. Die in Kap. 6.4 gewonnenen Erkenntnisse über das unterschiedliche Verhalten der verschiedenen Streichfarben lassen sich somit auch auf beidseitig gestrichene Papiere übertragen.

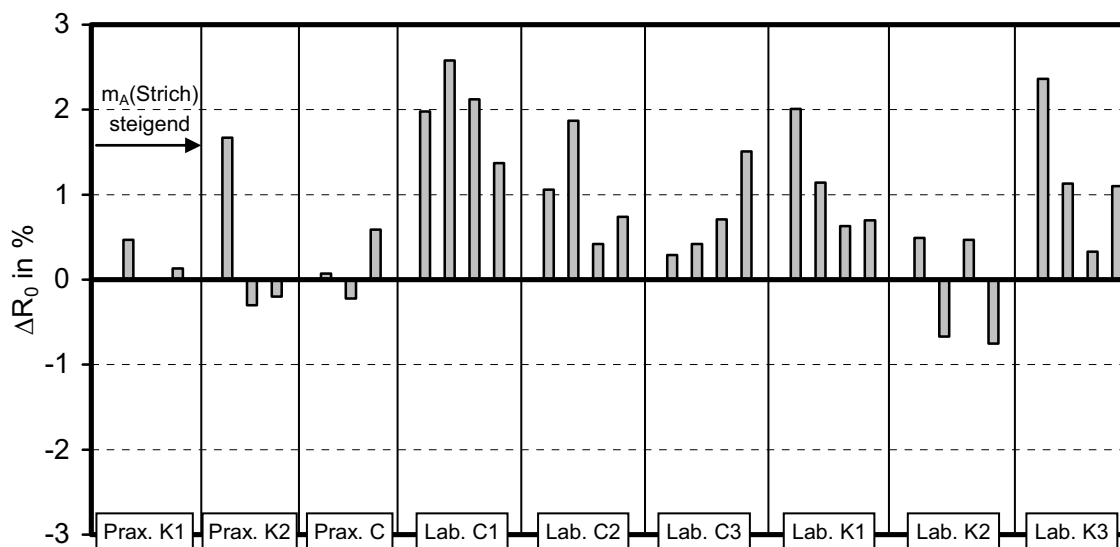


Abb. 6-37: Abweichung des Reflexionsfaktors R_0 bei Wahl des passenden Modells bezogen auf beidseitig gestrichenes Papier

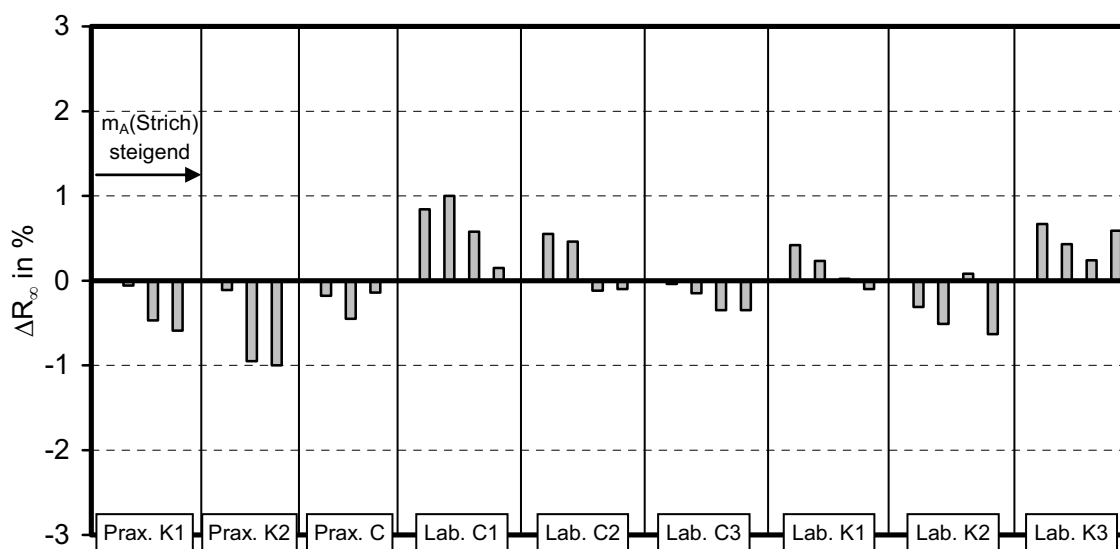


Abb. 6-38: Abweichung des Reflexionsfaktors R_∞ bei Wahl des passenden Modells bezogen auf beidseitig gestrichenes Papier

Bei der Betrachtung von Abb. 6-37 und Abb. 6-38 fällt auf, dass insbesondere im Fall der Laborstreichfarben die Werte für R_0 etwas größere Differenzen erkennbar sind als bei einseitig gestrichenen Papieren. Als Ursache dürfte der in Kap. 6.5.3 beschriebene Unterschied des tatsächlichen Verlaufs der Streichfarbkonzentration von dem den Modellrechnungen zugrunde liegenden, einfach zu beschreibenden verantwortlich sein. Die Fehler im Reflexionsfaktor R_∞ hingegen liegen unabhängig von der Anzahl der gestrichenen Seiten fast durchweg unter 1 % und in der Mehrzahl der betrachteten Proben sogar unter 0,5 %. Somit können die für die Berechnungen herangezogenen Modelle des Schichtaufbaus zur Beschreibung der optischen Eigenschaften als geeignet betrachtet werden.

Analog zu Abb. 6-30 sind in **Abb. 6-39** die Positionen der beidseitig mit jeweils etwa 10 g/m² gestrichenen Papiere in der optischen Zustandsebene dargestellt.

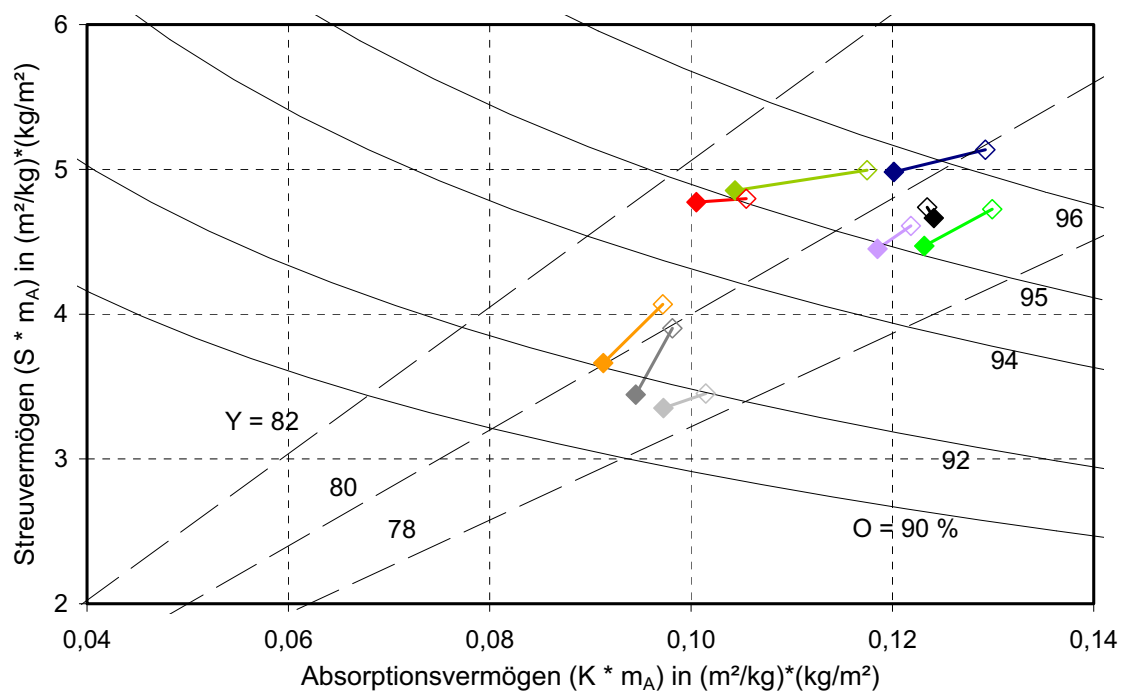


Abb. 6-39: Lage der gestrichenen Papiere (ausgefüllte Symbole) sowie der Ergebnisse der Modellrechnungen (offene Symbole) in der optischen Zustandsebene (flächenbezogene Masse des Strichauftrags ca. 10 g/m², beidseitiger Strich)

Die Differenzen der korrespondierenden Wertepaare fallen verglichen mit den einseitig gestrichenen Papieren etwas größer aus. Da in die Kalkulation von Streu- und Absorptionsvermögen die Kubelka-Munk-Koeffizienten S und K einfließen, die ihrerseits wiederum

aus den Reflexionsfaktoren R_θ und R_∞ berechnet werden, vergrößern sich die Fehler folglich mit jedem Weiterverarbeitungsschritt der Rohdaten. Und weil bei den beidseitig gestrichenen Papieren die doppelte Anzahl potenzieller Fehlerquellen auftritt, können höhere Fehlerwerte auch nicht überraschen. Betrachtet man Abb. 6-39 unter diesem Gesichtspunkt, dann kann man auf eine gute Übereinstimmung von Modell und Messung schließen.

7 **Zusammenhang zwischen Lichtstreuungskoeffizient und Porenoberfläche**

Die optischen Eigenschaften von Papier werden in erster Linie von den Streuprozessen bestimmt, die im Innern des Papiers stattfinden. Voraussetzung zum Auftreten von Streuphänomenen sind dabei Grenzflächen, an denen sich der Brechungsindex sprunghaft ändert. Da die Brechungsindizes von Fasermaterial und Füllstoffen üblicherweise sehr ähnliche Werte zeigen, kommen demnach bevorzugt luftgefüllte Hohlräume, die einen Brechungsindex nahe 1 aufweisen, als Streuzentren in Frage. Die Streueigenschaften eines Papiers sind folglich eng mit der Porenstruktur verknüpft. Es sollte sich also ein Zusammenhang zwischen Porenstruktur einerseits sowie optischen Kenngrößen andererseits finden lassen.

Die Problematik liegt dabei in der Wahl der geeigneten Parameter, die zueinander in Beziehung gesetzt werden. Aus theoretischen Überlegungen ergibt sich die Folgerung, dass das Streuvermögen eine Funktion der Licht streuenden Flächen sein sollte. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass für die Ermittlung des Streuvermögens wie für alle übrigen optischen Kenngrößen auch nur ein begrenzter Ausschnitt des elektromagnetischen Spektrums herangezogen wird, nämlich sichtbares Licht mit Wellenlängen zwischen 400 und 700 nm. Daher macht es für eine vergleichende Betrachtung keinen Sinn, sehr große und sehr kleine Poren mit einzubeziehen, da diese keinen Beitrag zur Lichtstreuung im sichtbaren Wellenlängenbereich leisten [122/123]. Die optischen Eigenschaften werden im Wesentlichen von Poren mit einem Durchmesser zwischen 100 und 600 nm determiniert [96/98]. Kleinere Poren streuen eher kurzwelliges ultraviolettes Licht, während analog größere Poren im längerwelligen Infrarotbereich wirksam werden.

Um die optischen Eigenschaften mit den Struktureigenschaften zu verbinden, sind solche Parameter auszuwählen, die die jeweilige Eigenschaft am treffendsten charakterisieren. Im Fall der Streueigenschaft ist dies der dichtebezogene Lichtstreuungskoeffizient S , während sich zur Beschreibung der Porenstruktur die Oberfläche der Licht streuenden Poren anbietet. Der Kubelka-Munk-Koeffizient S lässt sich über die Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ sowie die flächenbezogene Masse m_A gemäß (3-21) bestimmen. Für die Ermittlung der Porenoberfläche kam das in Kap. 4 beschriebene Verfahren zur Ermittlung der Porengrößenverteilung mittels Quecksilberintrusion zum Einsatz. Als Kenngröße wurde in diesem Fall die

massenbezogene spezifische Oberfläche der Poren im Durchmesserbereich zwischen 100 und 600 nm herangezogen.

Zur Schaffung einer ausreichend breiten Datenbasis wurden mehr als 100 Papierproben geprüft. Darunter befanden sich sowohl industriell als auch laborativ erzeugte Papiere. Von den industriell hergestellten Papieren waren Exemplare folgender Sorten vertreten:

- Telefonbuchpapier,
- Zeitungsdruckpapiere (auch aufgebessertes Zeitungsdruckpapier, ungeglättet und geglättet),
- SC-Papiere (Qualität A und B, Rohpapier und satiniert),
- LWC-Papiere (Tiefdruck und Offset, Rohpapier/gestrichen/satiniert),
- Kopierpapiere (Recyclingfasern, Frischfasern),
- Inkjetpapiere,
- Transparentpapier.

Für die im Labor gefertigten Papiere kamen zwei unterschiedliche Blattbildungsaggregate zum Einsatz, nämlich ein Rapid-Köthen-Blattbildner sowie ein M/K-Sheetformer. Als Faserrohstoffe dienten zum einen Holzstoffe unterschiedlichen mechanischen Behandlungsgrades, die in reiner Form und in einer Mischung mit Zellstoff verarbeitet wurden, zum anderen wurden Mischungen aus Zellstoff und deinktem Altpapierstoff sowie verschieden stark gemahlene Zellstoffe untersucht.

Etwa die Hälfte aller untersuchten Proben waren gestrichene Papiere. Der Großteil dieser Proben wurde im Labor mittels eines Rakel-Streichgeräts gestrichen. Als Trägermaterial für die Streichfarbe dienten dabei entweder industriell gefertigtes LWC-Streichrohpapier oder Laborblätter aus einer Holzstoff-Zellstoff-Mischung, die auf dem M/K-Sheetformer hergestellt worden waren. Die übrigen Papiere waren industriell oder halbtechnisch gestrichene Papiere.

Ferner wurde ein Teil der untersuchten Papiere kalandriert. Auch hier kamen unterschiedliche Aggregate zum Einsatz, sodass sowohl industriell als auch halbtechnisch und laborativ kalandrierte Proben zur Verfügung standen.

Auf diese Weise ergab sich eine große Bandbreite unterschiedlichster Papiere, die sich im Hinblick auf Blattbildungsaggregat, Faserstoffzusammensetzung, flächenbezogener Masse sowie im Fall der gestrichenen Papiere hinsichtlich Rohpapier, Streichpigment, Auftragsaggregat und aufgetragener Streichfarbenmenge unterscheiden. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Eigenschaften der untersuchten Papiere.

Tabelle 4: Übersicht über die Charakteristika der in Abb. 7-1 dargestellten Papiere

Merkmal	Wert
Herstellungsverfahren (Papier)	<ul style="list-style-type: none"> • Rapid-Köthen-Blattbildner • M/K- Blattbildner • Papiermaschine
Faserrohstoff	<ul style="list-style-type: none"> • 100 % DIP • 100 % Primärfaser (Holzstoff/Zellstoff) • verschiedene Mischungen DIP-Primärfaser
Flächenbezogene Masse (Endprodukt)	34 – 170 g/m ²
Streichrohpapier	<ul style="list-style-type: none"> • LWC-Rohpapier (industriell) • M/K-Papier (laborativ)
Streichpigment	<ul style="list-style-type: none"> • Kaolin • Calciumcarbonat
Strichauftrag	<ul style="list-style-type: none"> • laborativ • halbtechnisch • industriell
Flächenbezogene Masse (Strich)	5 – 30 g/m ²

In **Abb. 7-1** sind die ermittelten Werte für den Kubelka-Munk-Koeffizienten S in Abhängigkeit der massenbezogenen Oberfläche der Poren zwischen 100 und 600 nm Durchmesser dargestellt. Die Resultate der glänzenden Papiere sind separat eingezeichnet, da die Bestimmung des Lichtstreuungskoeffizienten für solche Proben stets fehlerbehaftet ist, wie in Kap. 3.2.3.5 gezeigt wurde.

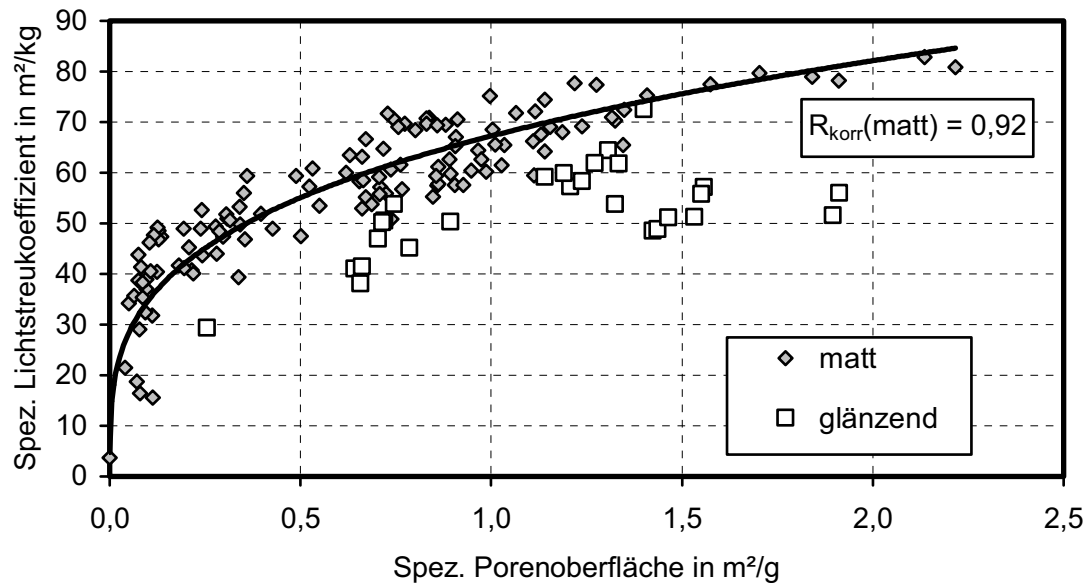


Abb. 7-1: Dichtebezogener Lichtstreckoeffizient S als Funktion der massenbezogenen Porenoberfläche (Porendurchmesser 100 – 600 nm) verschiedener grafischer Papiere, unterteilt in matte und glänzende Papiere mit Ausgleichskurve der matten Papiere

Die Lage der Messwerte in Abb. 7-1 lässt auf einen Zusammenhang von Streukoeffizient und Porenfläche schließen. Daran schließt sich die Frage an, welche mathematische Funktion diesen Zusammenhang am besten beschreiben kann. Unter Berücksichtigung der Randbedingungen wird klar, dass eine lineare Funktion nicht die Lösung sein kann. Lässt man nämlich die Porenfläche gegen Null laufen, muss auch der Streukoeffizient gegen Null streben. Ein linearer Funktionsverlauf müsste demzufolge im Koordinatenursprung beginnen. Das wiederum hätte aber zur Folge, dass die Funktion die Lage der Messwerte im Diagramm nicht mehr vernünftig abbilden könnte. Aus diesem Grund liegt es näher, eine nichtlineare Funktion zur Beschreibung des Zusammenhangs heranzuziehen.

Die in Abb. 7-1 eingezeichnete Ausgleichskurve für die matten Papiere ist eine Potenzfunktion, die alle Randbedingungen erfüllen kann. Neben der Frage des Ursprungs trägt diese Funktion auch der Forderung Rechnung, dass bei kleinen Porenflächen der Streukoeffizient schneller wachsen sollte als bei großen Porenflächen, dass also der Zuwachs der spezifischen Porenfläche um den festen Betrag ΔA_{Pore} mit zunehmender Gesamtporenfläche einen immer geringeren Zuwachs des Streukoeffizienten ΔS zur Folge hat. Je größer nämlich die streuende Porenfläche ist, umso weniger gravierend wirkt sich eine weitere

Zunahme der Porenfläche auf das Gesamtstreuvermögen aus. Bei genügend großer Porenfläche wird schließlich nahezu alles Licht gestreut, sodass eine weitere Zunahme der Porenfläche ohne Auswirkung auf das Streuvermögen bleibt. Bei Zugrundelegung eines linearen Zusammenhangs könnte diese letzte Randbedingung dagegen nicht erfüllt werden. Der Streukoeffizient wüchse stattdessen immer weiter, was unter physikalischen Gesichtspunkten sinnlos wäre.

Es bleibt aber festzuhalten, dass die eingezeichnete Ausgleichskurve lediglich eine Beschreibung der Lage der Messwerte darstellt und nicht aus physikalischen Gesetzmäßigkeiten abgeleitet wurde. Um dies bewerkstelligen zu können, wäre eine exakte Kenntnis der geometrischen Form der sich ausbildenden Poren und damit der genauen Porenoberfläche erforderlich. Mit der hier eingesetzten Messtechnik muss hingegen ein vereinfachtes Modell der Poren zugrunde gelegt werden, sodass eine präzise mathematische Beschreibung nicht möglich ist. Daher kann es auch nicht gelingen, eine obere Grenze für die Porenoberfläche und damit für den Lichtstreuungskoeffizient anzugeben. Trotz dieser Einschränkungen kann die Ausgleichskurve die Entwicklung des Streukoeffizienten in Abhängigkeit der Porenoberfläche für matte Papiere jedoch recht gut zu beschreiben, wie der hohe Korrelationskoeffizient von $R_{\text{Korr}} = 0,92$ erkennen lässt.

Wie aus Abb. 7-1 hervorgeht, folgen die glänzenden Papiere dem für die matten Papiere geltenden Zusammenhang nicht. Die Ursache liegt im Kubelka-Munk-Koeffizienten S , dessen Bestimmung an glänzenden Proben wegen der unzureichenden Messtechnik grundsätzlich fehlerbehaftet ist. Je höher der Glanz ist, umso größer ist der zu erwartende Fehler. Daher zeigen die Messwerte der glänzenden Proben in Abb. 7-1 mehr oder weniger deutliche Abweichungen von der Ausgleichskurve der matten Papiere. Mit steigendem Glanz vergrößert sich dabei auch der Abstand zur Ausgleichskurve.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die vorliegenden Ergebnisse das Modell von Papier als einem Netzwerk aus Fasern, Füllstoffen und Luft, dessen Poren als Streuzentren für sichtbares Licht wirken, untermauern. Als wirksam im Hinblick auf sichtbares Licht erweisen sich aber nur jene Poren, deren Durchmesser im Bereich zwischen 100 und 600 nm liegen. Nur diese können nämlich den sichtbaren Teil des elektromagnetischen Spektrums effektiv streuen und damit die in diesem Bereich messtechnisch erfassten Parameter beeinflussen.

Um nun den makroskopischen Effekt der Lichtstreuung mit dem mikroskopischen Phänomen der Porenstruktur zu verbinden, bieten sich als Parameter der dichtebezogene Lichtstreuungskoeffizient und die spezifische Porenoberfläche der Poren im Größenbereich zwischen 100 und 600 nm an. Trägt man diese Größen gegeneinander auf, beschreiben die Wertepaare in guter Näherung eine Potenzfunktion. Auch die Randbedingungen lassen sich auf diese Weise sehr gut erfüllen. Allem Anschein nach besteht also zwischen dem Lichtstreuungskoeffizient und der spezifischen Porenoberfläche ein innerer Zusammenhang, der sich über eine Potenzfunktion mathematisch beschreiben lässt. Allerdings gilt dieser Zusammenhang nur für matte Papiere, da die Bestimmung der optischen Eigenschaften glänzender Papiere stets fehlerbehaftet ist.

8 Zusammenfassung

Grafische Papiere stellen im Hinblick auf den Umsatz den bedeutendsten Anteil der gesamten Papierproduktion dar. Die wichtigsten Qualitätskriterien der grafischen Papiere sind neben der Bedruckbarkeit die optischen Eigenschaften wie beispielsweise Helligkeit, Opazität oder Farbtort. Beschreiben lassen sich die optischen Eigenschaften mithilfe von Kenngrößen, die sich aus der Theorie von Kubelka und Munk ableiten. Diese Theorie bietet die Möglichkeit, die optischen Eigenschaften basierend auf einfachen Reflexionsmessungen zu modellieren und die Werte zu quantifizieren. Voraussetzung dabei ist, dass Papier sich wie ein trübes Medium verhält, in dem das Licht auf vielfältige Weise gestreut wird, während die Absorption nur eine untergeordnete Rolle spielt. Als Streuzentren wirken die Grenzflächen zwischen den verschiedenen Papierbestandteilen wie Fasern, Füllstoffpigmenten und luftgefüllten Hohlräumen, die zumeist unterschiedliche Brechungsindizes aufweisen.

Soll ein Papier hinsichtlich der optischen Eigenschaften modelliert werden, ist der Aufbau des Papiers von entscheidender Bedeutung. Bei einschichtigen und einlagigen Papieren sind die verschiedenen Bestandteile, also Fasern, Fein- und Füllstoffe, in der Regel gleichmäßig über die Dicke verteilt. In diesem Fall können die Kubelka-Munk-Koeffizienten S und K des Papiers über eine einfache Mischungsregel bestimmt werden, indem die Koeffizienten der einzelnen Komponenten massengewichtet aufsummiert werden. So lassen sich z. B. die optischen Eigenschaften eines SC-Papiers, welches eine Mischung aus Zellstoff, Holzstoff und Füllstoffen darstellt, berechnen, indem die Bestandteile separat vermessen und ihres Massenanteils entsprechend gewichtet addiert werden. Auf diese Weise besteht die Möglichkeit, die optischen Eigenschaften einer beliebigen Kombination der Komponenten rechnerisch zu bestimmen, ohne aufwändige Versuche durchführen zu müssen.

Handelt es sich bei dem zu modellierenden Papier hingegen um ein gestrichenes Papier, ist die Mischungsregel nicht mehr anwendbar. Da ein gestrichenes Papier eine geschichtete Struktur aufweist, tragen die verschiedenen Komponenten in unterschiedlichem Maß zu den optischen Eigenschaften des Gesamtsystems bei. Den größten Beitrag liefert die an der Oberfläche liegende Schicht aus Streichfarbe, während das darunter befindliche Rohpapier aufgrund der Abdeckung durch den Strich nicht mehr in vollem Umfang wirksam werden

kann. Um die unterschiedlichen Beiträge der verschiedenen Schichten in angemessener Weise zu berücksichtigen, muss daher auf Berechnungsvorschriften zurückgegriffen werden, welche die Schichtstruktur berücksichtigen und sich ebenfalls aus der Kubelka-Munk-Theorie ableiten lassen. Mit der Kenntnis der optischen Eigenschaften der einzelnen Schichten wird so das gesamte Schichtsystem für eine beliebige Anzahl von Schichten berechenbar.

In die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit einbezogen wurden verschiedene Streichfarben, von denen ein Teil einer industriellen Produktionsanlage entstammte, während die anderen im Labormaßstab hergestellt wurden. Die industriellen Streichfarben waren fertig aufbereitet und enthielten diverse chemische Hilfsmittel, um eine problemlose Verarbeitung in der Streichmaschine zu gewährleisten. Dem gegenüber bestanden die Laborstreichfarben lediglich aus Pigmenten und einem konstanten Anteil an Bindemittel, damit der Einfluss der Pigmente möglichst klar hervortreten konnte. Daher wurden verschiedene Pigmenttypen von Kaolin und Calciumcarbonat untersucht, welche sich in der Partikelgrößenverteilung unterschieden.

Voraussetzung zur Modellierung der gestrichenen Papiere ist die Kenntnis der optischen Eigenschaften von Schichten aus reiner Streichfarbe. Ohne ein Trägermaterial sind solche Strichschichten aber im Bereich niedriger flächenbezogener Massen technisch nicht herstellbar. Um die optischen Eigenschaften der Streichfarben zu ermitteln, kam daher als Trägermaterial eine transparente Folie zum Einsatz, deren Einfluss rechnerisch eliminiert wurde. Auf diese Weise war es möglich, die optischen Eigenschaften der isolierten Strichschichten zu ermitteln. Ferner konnte mithilfe der gestrichenen Folien gezeigt werden, dass die Berechnungen von Schichtsystemen auf Basis des Kubelka-Munk-Modells eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messungen aufweisen.

Bei der Betrachtung eines gestrichenen Papiers stößt man auf das Problem, dass sich zwischen der Strichschicht und dem Rohpapier eine Mischschicht ausbildet, die der direkten Beobachtung nicht zugänglich ist. Weder die genaue Dicke noch die Zusammensetzung dieser Mischschicht sind bekannt, sodass auch die optischen Eigenschaften, die im Wesentlichen durch genau diese Parameter determiniert werden, nicht ermittelbar sind. Um nun das gestrichene Papier berechnen zu können, muss demzufolge eine Möglichkeit gefunden werden, die Mischschicht modellhaft zu beschreiben und so die optischen Eigen-

schaften abzuleiten. Ein denkbarer Ansatz wäre, diese Schicht als eine homogene Mischung aus Streichfarbe und Rohpapier aufzufassen. Da diese Vorstellung die realen Verhältnisse jedoch kaum korrekt widerspiegelt, ist eine Anpassung erforderlich, um die speziellen Eigenschaften der Mischschicht besser zu beschreiben. Dies kann mithilfe einer modifizierten Mischungsregel geschehen, bei der die Kubelka-Munk-Koeffizienten der beiden Bestandteile nicht allein hinsichtlich der Massenanteile, sondern in Bezug auf die vermutete optische Wirkung innerhalb der Mischschicht gewichtet werden. Auf diese Weise lassen sich die optischen Eigenschaften der Mischschicht auch ohne genaue Kenntnis ihrer Zusammensetzung aus den Daten der einzelnen Komponenten durch eine geeignete Wahl der Gewichtungsfaktoren berechnen. Die Wahl der Gewichtungsfaktoren hängt dabei von verschiedenen Parametern wie der Art und Größenverteilung der Pigmente, aber auch der Zusammensetzung der Streichfarbe ab.

Die Modellrechnungen ließen erkennen, dass sich kein allgemein gültiger Ansatz zur korrekten Beschreibung aller Streichfarben finden lässt. Insbesondere der Typ des Pigments scheint entscheidend für die Wahl des passenden Modells zu sein. Unabhängig von der Zusammensetzung zeigt bei allen Streichfarben auf Kaolinbasis das modifizierte Dreischichtmodell die geringsten Abweichungen zwischen Messung und Berechnung. Dieses Modell geht von der Annahme aus, dass die Hälfte der applizierten Streichfarbe in den oberen Bereich des Rohpapiers eindringt und dort eine Mischschicht bildet. Die andere Hälfte der Streichfarbe verbleibt auf der Paperoberfläche und formt eine reine Strichschicht. Bei entsprechender Wahl der Gewichtungsfaktoren zur Ermittlung der optischen Eigenschaften der Mischschicht betragen die Abweichungen bei den Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ unabhängig von der flächenbezogenen Masse des Strichs zumeist weniger als 1 %.

Die auf Calciumcarbonat basierenden Streichfarben erfordern dem gegenüber einen anderen Ansatz. Die Ergebnisse zweier Laborstreichfarben lassen sich am ehesten durch ein Zweischichtmodell mit einer Mischschicht aus Streichfarbe und Rohpapier erklären, während die Praxisstreichfarbe sowie eine weitere Laborstreichfarbe die Ausbildung einer isolierten Strichschicht nahe legen. Bei letztgenannter Laborstreichfarbe ist diese Annahme aber sehr fraglich, da die darin vorhandenen Pigmente eine sehr geringe Größe aufweisen und daher im Gegensatz zum Modellansatz vermutlich verhältnismäßig tief ins Rohpapier eindringen können. Hier spielt eher die Wechselwirkung zwischen Rohpapier und Streichfarbe mit der daraus resultierenden Porenstruktur die entscheidende Rolle. Zur Lichtstreu-

ung im sichtbaren Wellenlängenbereich können nämlich grundsätzlich nur Poren im Größenbereich zwischen etwa 100 und 600 nm einen Beitrag leisten. Bedingt durch die geringe Teilchengröße der Pigmente dieser Streichfarbe wird in den isolierten Strichschichten eine Porenstruktur mit sehr kleinen Poren geschaffen, deren Streuvermögen daher nur sehr gering ist. Beim Auftragen auf das Rohpapier führt die Penetration der Streichfarbe dann zur Ausbildung einer Porenstruktur, dessen Streuvermögen höher liegt als das der beiden Einzelkomponenten. Dadurch entsteht der Eindruck, als könnte das gestrichene Papier nur durch das Modell mit isolierter Strichschicht, bei dem der Strich seinen maximalen optischen Wirkungsgrad entfalten kann, angemessen nachgestellt werden. Tatsächlich handelte es sich aber um ein System mit einer Mischschicht, deren Streuvermögen lediglich höher liegt als direkt vom Modell abzuleiten ist.

Die Modelle, welche die optischen Eigenschaften der gestrichenen Papiere am treffendsten beschreiben, gelten gleichermaßen für einseitig wie auch für beidseitig gestrichene Proben. Die Abweichungen, die sich zwischen Messung und Berechnung ergeben, liegen aufgrund der Fehleraddition im Fall der beidseitig gestrichenen Papiere etwas höher als bei den einseitig gestrichenen, sind aber generell sehr gering. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die den Modellen zugrunde liegenden Annahmen weitgehend korrekt sind und die optischen Eigenschaften mit hinreichender Genauigkeit berechnet werden können.

Die Untersuchung der Porengrößenverteilung mittels Quecksilber-Porosimetrie ließ den entscheidenden Einfluss der Porenstruktur auf die optischen Eigenschaften erkennen. Anhand einer Vielzahl unterschiedlicher grafischer Papiere konnte gezeigt werden, dass zwischen den makroskopischen optischen Eigenschaften und der mikroskopischen Struktur des Papiergefüges ein funktionaler Zusammenhang besteht. Trägt man den dichtebezogenen Lichtstreuoeffizienten gegen die spezifische Oberfläche der Poren im Größenbereich zwischen 100 und 600 nm auf, lässt sich der Verlauf der Messpunkte in sehr guter Annäherung durch eine Potenzfunktion beschreiben. Ausgenommen davon sind allerdings stark glänzende Papiere, welche die Voraussetzungen zur Anwendbarkeit der Kubelka-Munk-Theorie nicht erfüllen und deren optische Eigenschaften daher aufgrund der unzureichenden Messtechnik der allgemein verwendeten Farbmessgeräte nicht korrekt bestimmt werden können.

9 Literaturverzeichnis

- 1 Kubelka, P.; Munk, F.: Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche. *Z. techn. Physik* **12** (1931), 593-601
- 2 Mie, G.: Beiträge zur Optik trüber Medien. *Ann. Physik* **25** (1908), 377-445
- 3 Kortüm, G.: Reflexionsspektroskopie. Springer-Verlag Berlin, 1969
- 4 Pedrotti, F.L.; Pedrotti, L.S.; Bausch, W.; Schmidt, H.: *Optik für Ingenieure*, 2. Aufl., Springer-Verlag Berlin, 2002
- 5 Gehrtsen, C.; Kneser, H.O.: *Physik*, 10. Aufl., Springer-Verlag Berlin, 1986
- 6 Rayleigh, J.W.: On the light from the sky, its polarization and colour. *Philos. Mag.* **41** (1871), 107-120
- 7 Mütze, K.; Foitzik, L.; Krug, W.; Schreiber, G.: *ABC der Optik*, Dausien-Verlag Hanau/Main, 1961
- 8 Bohren, C.F.; Huffman, D.R.: *Absorption and scattering of light by small particles*, John Wiley & Sons New York, 1998
- 9 Michel, B.: Mie-Streuung. 01.06.2002 (Stand 11.08.2004). Verfügbar im Internet: <http://www.lightscattering.de/MieCalc/>. – online im Internet
- 10 Pu, Qu.; McKean, W.; Gustafson, R.: Kinetic model of softwood kraft pulping and simulation of RDH process. *Appita* **14** (1991), Nr. 6, 399-404
- 11 Masura, V.: Mathematical model for acid sulphite pulping process. *J. of Wood Chemistry and Technology* **15** (1995), Nr. 2, 263-286
- 12 Kimpe, E.; Morin, F.; Kubes, G. J.: 3-dimensional computer simulation model for liquor penetration in CMP and CTMP processes. *J. Pulp Pap. Sc.* **25** (1999), Nr. 1, 15-20
- 13 Andersson, N.; Wilson, D.I.; Germgard, U.: An improved kinetic model structure for softwood kraft cooking. *Nordic Pulp Pap. Res. J.* **18** (2003), Nr. 2, 200-209
- 14 Coucharriere, C.; Mortha, G.; Lachenal, D.; Briois, L.; Larnicol, P.: Rationalization of the use of TAED during activated peroxide delignification and bleaching. Part I: Kinetic model. *J. Pulp Pap. Sc.* **28** (2002), Nr. 10, 332-340
- 15 Meng, M. X.; Hsieh, J. S.: Improved ozone efficiency at reduced charges - an electrochemical model and new experimental approach. *Tappi J.* **83** (2000), Nr. 9, 67

- 16 Nguyen, K. L.; Liang, H.: Kinetic model of oxygen delignification. Part 1 - effect of process variables. *Appita* **55** (2002), Nr. 2, 162-165
- 17 Fan, X.; Ouellet, D.; Jeffrey, D. J.: A time-dependant model for a single-disc refiner: local density fluctuations. *J. Pulp Pap. Sc.* **23** (1997), Nr. 1, J1-J5
- 18 Qian, X.; Tessier, P.: A mechanistic model for predicting pulp properties from refiner operating conditions. *Tappi J.* **78** (1995), Nr. 4, 215-222
- 19 Allison, B. J.; Isaksson, A. J.; Karlström, A.: Distributed parameter model of a TMP refiner. *Pulp Paper Can* **98** (1997), Nr. 8, T282-T284
- 20 Fan, X.; Jeffrey, D. J.; Ouellet, D.: Stochastic model for the motion of pulp in a single disc chip refiner. *CPPA Annual Meeting 1995*, B37-B40
- 21 Härkönen, E.; Ruottu, S.; Ruottu, A.; Johansson, A.: A Theoretical Model for a TMP-Refiner. *Int. Mechanical Pulping Conf. 1997*, 95-102
- 22 Sui, O. S.; Sanche, L.; Mills, C.; Smith, W.; Douglas, T.: Model based pulp quality control of TMP refiner. *Tappi Pulping Conf. 1998*, 295-308
- 23 Olson, J.; Wherett, G.: A model of fibre fractionation by slotted screen apertures. *J. Pulp Pap. Sc.* **24** (1998), Nr. 12, 398-403
- 24 Yu, C. J.; Crossley, B. R.; Silveri, L.: Fundamental study of screening hydraulics. Part 3. Model for calculating effective open area. *Tappi J.* **77** (1994), Nr. 9, 125-131
- 25 Khanbaghi, M.; Allison, B. J.; Olson, J. A.; Backström, J.: A dynamic model of pressure screen hydraulics. *J. Pulp Pap. Sc.* **27** (2001), Nr. 4, 124-129
- 26 Pan, R.; Paulsen, F. G.; Johnson, D. A.; Bousfield, D. W.; Thompson, E. V.: A global model for predicting flotation efficiency. *Tappi J.* **79** (1996), Nr. 4, 177-185
- 27 Bennington, C. P. J.; Wang, M.-H.: Kinetic model of ink detachment in the repulper. *Res. Forum Recycling 1999*, 15-21
- 28 Putz, H.-J.; Schaffrath, H.-J.; Götsching, L.: Deinking of oil- and water-borne printing inks. A new flotation de-inking model. *Pulp Paper Can.* **94** (1993), Nr. 7, T193-T198
- 29 Turnbull, P. F.; Perkins, N. C.; Schultz, W. W.; Beuther, P. D.: One-dimensional dynamic model of a paper forming process. *Tappi J.* **80** (1997), Nr. 1, 245-253
- 30 Ramarao, B. V.; Kumar, P.: A model for the gravity drainage of papermaking suspensions. *Nordic Pulp Pap. Res. J.* **11** (1996), Nr. 2, 86-94

- 31 Dodson, C. T. J.; Sampson, W. W.: A model for the retention of particles in evolving fibre networks. *Fundamentals of Papermaking Materials* 1997, 1161-1174
- 32 Farnood, R. R.; Dodson, C. T. J.; Loewen, S. R.: Modeling flocculation. Part I: random disk model. *J. Pulp Pap. Sc.* **21** (1995), Nr. 10, J348-J356
- 33 Middleton, S. R.; Scallan, A. M.: A kinetic model for the adsorption of fillers by pulp fibers. *J. Pulp Pap. Sc.* **17** (1991), Nr. 4, J127-J133
- 34 Ven, T. G. M. van: A model for the adsorption of polyelectrolytes on pulp fibers: relation between fiber structure and polyelectrolyte properties. *Nordic Pulp Pap. Res. J.* **15** (2000), Nr. 5, 494-501
- 35 Kerekes, R. J.; McDonald, J. D.: A decreasing permeability model of wet pressing: theory. *Tappi Engineering Conf.* 1991, 551-558
- 36 Kataja, M.: Hydrodynamical model of wet pressing of paper. *Tappi Engineering Conf.* 1992, 403-423
- 37 Chen, E. J.: A two-dimensional viscous model of a wet paper forming process. *Tappi Int. Engineering Conf.* 1998, 21-52
- 38 Skelton, J.; Toney, M. M.: A computer model of a roll press nip. *Tappi J.* **84** (2001), Nr. 3, 55
- 39 Fu, Y.; Dumont, G.; Davies, M.: A nonlinear model for the paper machine dry weight CD profile. *Nordic Pulp Pap. Res. J.* **10** (1995), Nr. 2, 129-132
- 40 Chen, G.; Douglas, W. J. M.: Combined impingement and through air drying of paper: a comprehensive model. *Tappi J.* **81** (1998), Nr. 1, 244-253
- 41 Berrada, M.; Elkadri, N. E.; Rebaine, A.; Elkadiri, M.: A physical model for condensation steam in paper dryers, numerical solutions obtained by finite element method. *Tappi Int. Engineering Conf.* 1998, 1073-1083
- 42 Karlsson, M.: Analysis of performance of a multicylinder dryer, using computer simulation model and experimental data. *Appita* **48** (1995), Nr. 2, 143-146
- 43 Heaven, E. M.; Manness, M. A.; Vu, K. M.; Vyse, R. N.: Application of systems identification to paper machine model development and simulation. *Pulp Paper Can.* **97** (1996), Nr. 4, T138-T143
- 44 Ninness, B.; Bousfield, D. W.; Trinatafillopoulos, N. G.: Fluid dynamics model of the film-fed rolling nip with a porous web. *Tappi Coating/Papermaking Conf.* 1998, 515-530

- 45 Carreau, P. J.; Lavoie, P.-A.: Rheology of suspensions: the use of model fluids to simulate the flow behaviour of coating colours. CPPA Annual Meeting 1996, B49-B53
- 46 Lee, D. I.: The critical pigment volume concentration concept for paper coatings. Part I: model coating systems using plastic pigments and latex binders for paper coating applications. Tappi Coating/Papermaking Conf. 1998, 311-335
- 47 Toivakka, M.: A simulation model to predict coating coverage. *Paperi ja Puu* **83** (2001), Nr. 1, 34-41
- 48 Vidal, D.; Zou, X.; Uesaka, T.: Modeling coating structure development using a Monte Carlo deposition method. Part 2: validation of the model and case study. *Solutions* **86** (2003), Nr. 5, 47
- 49 Kawka, D. W.; Crotogino, R. H.; Douglas, W. J. M.: Calendering model for CD control. CPPA Annual Meeting 1999, A327-A330
- 50 Bohan, M. F. J.; Claypole, T. C.; Gethin, D. T.; Megat Ahmed, M. M. H.: A model for ink impression in printing contacts. *J. Pulp Pap. Sc.* **26** (2000), Nr. 11, 414-419
- 51 Xiang, Y.; Bousfield, D.W.; Hayes, P.C.: A model to predict ink-setting rates based on pore size distribution. *J. Pulp Pap. Sc.* **30** (2004), Nr. 5, 117-120
- 52 Qi, D.: Three-dimensional generalized anisotropic Cox-type structural model of a fiber network. *Tappi J.* **80** (1997), Nr. 11, 165-171
- 53 Lu, W.; Carlsson, L. A.; Andersson, Y. de: Micro-model of paper. Part 1: bounds on elastic properties. *Tappi J.* **78** (1995), Nr. 12, 155-164
- 54 Lu, W.; Carlsson, L. A.: Micro-model of paper. Part 2: Statistical analysis of the paper structure. *Tappi J.* **79** (1996), Nr. 1, 203-210
- 55 Lu, W.; Carlsson, L. A.; Ruvo, A. de: Micro-model of paper. Part 3: mosaic model. *Tappi J.* **79** (1996), Nr. 2, 197-205
- 56 Alfthan, J.: A simplified network model for mechano-sorptive creep in paper. *J. Pulp Pap. Sc.* **29** (2003), Nr. 7, 228-234
- 57 Morgan, D.G.: A mechanistic creep model and test procedure. *APPITA* **57** (2004), Nr. 4, 299-304
- 58 Donner, B. C.: An heuristic model of paper rupture. *Fundamentals of Papermaking Materials* 1997, 1215-1247

- 59 Urbanik, T. J.: A more mechanistic model of the compression strain-load response of paper. *J. Pulp Pap. Sc.* **28** (2002), Nr. 6, 211-216
- 60 Heikkilä, I.: Viscoelastic model of paper surface compressibility. *Paperi ja Puu* **79** (1997), Nr. 3, 186-192
- 61 Qi, D.: Microstructural model for a three-dimensional fiber network. *Tappi J.* **80** (1997), Nr. 1, 283-292
- 62 Gates, D. J.; Westcott, M.: A stochastic line model for paper stiffness. *Appita* **49** (1996), Nr. 3, 189-192
- 63 Dodson, C.T.J.; Sampson, W.W.: The effect of paper formation and grammage on its pore size distribution. *J. Pulp Pap. Sc.* **22** (1996), Nr. 5, J165-J169
- 64 Pauler, N.: *Optische Papiereigenschaften*. AB Lorentzen & Wettre, Kista, Schweden, 1999
- 65 Stokes, G.G.: On the intensity of the light reflected from or transmitted through a pile of plates. *Proc. Roy. Soc. London* **11** (1862), 545-557
- 66 Schmidt, G.: Die Transparenz und die Lichtremission von Papieren – Theorie und Messverfahren. *Papier* **13** (1959), Nr. 7/8, 141-149
- 67 Schmidt, G.: Die Blattstoßtheorie – Eine vereinfachte Darstellung der Remissions- und Transparenzverhältnisse am Papier. *Papier* **14** (1960), Nr. 10, 445-452
- 68 Bronstein, I.N.; Semendjajew, K.A.: *Taschenbuch der Mathematik*, 22. Aufl., Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt/Main, 1985
- 69 Van den Akker, J.A.: Scattering and absorption of light in paper and other diffusing media. *Tappi J.* **32** (1949), Nr. 11, 498-501
- 70 Stenius, A.S.: The application of the Kubelka-Munk theory to the diffuse reflection of light from paper. *Svensk Papperstidning* **54** (1951), Nr. 19, 663-670
- 71 Olf, H.G.: Correspondences between the Kubelka-Munk and the Stokes model of strongly light-scattering materials. *Tappi J.* **72** (1989), Nr. 5, 222-227
- 72 Béland, M.-C.; Mattsson, L.: Optical print quality of coated papers. *J. Pulp Pap. Sc.* **23** (1997), Nr. 10, J493-J498
- 73 Granberg, H.; Rundloef, M.; Mattsson, L.: Influence of surface-induced nonuniform reflectance on the diffuse reflectance factor. Part I: model predictions. *J. Pulp Pap. Sc.* **29** (2003), Nr. 8, 247-253

- 74 Jordan, B.D.; O'Neill, M.A.; Somerville, N.A.; Bain, R.W.: Opacity sidedness in paper and pulp sheets. *J. Pulp Pap. Sc.* **16** (1990), Nr. 4, J126-J130
- 75 Leskelä, M.: Optical calculations of multilayer papers. *Tappi J.* **78** (1995), Nr. 10, 167-172
- 76 Leskelä, M.: Optical properties. In: *Papermaking Science and Technology*, book 16, chapter 4
- 77 Scallan, A.M.; Borch, J.: An interpretation of paper reflectance based upon morphology. *Tappi J.* **55** (1972), Nr. 4, 583-588
- 78 Kubelka, P.: New contributions to the optics of intensely light scattering materials. *J. Opt. Soc. Am.* **44** (1954), Nr. 4, 330-336
- 79 Pauler, N.: Opacity and reflectivity of multilayer structures. *Paper – structure and properties* (Hrsg: J.A. Bristow, P. Kolseth) *Int. Fiber Sc. Technol. Series Vol. 8* Marcel Dekker Inc., New York, 1986
- 80 Carlsson, J.; Persson, W.; Hellentin, P.; Malmqvist, L.: The propagation of light in paper: modelling and Monte-Carlo simulations. *TAPPI Int. Paper Physics Conf. Proc.*, Atlanta, 1995, 83-92
- 81 Leskelä, M.: A model for the optical properties of paper. Part 1 – The theory. *Paperi ja Puu* **75** (1993), Nr. 8, 683-688
- 82 Leskelä, M.: A model for the optical properties of paper. Part 2 – The simulation model. *Paperi ja Puu* **76** (1994), Nr. 1-2, 67-73
- 83 Koukoulas, A.A.; Jordan, B.D.: Effect of strong absorption on the Kubelka-Munk scattering coefficient. *J. Pulp Pap. Sc.* **23** (1997), Nr. 5, J224-J232
- 84 Rundlöf, M.; Bristow, J.A.: A note concerning the interaction between light scattering and light absorption in the application of the Kubelka-Munk equations. *J. Pulp Pap. Sc.* **23** (1997), Nr. 5, J220-J223
- 85 Granberg, H.; Edström, P.: Quantification of the intrinsic error of the Kubelka-Munk model caused by strong light absorption. *J. Pulp Pap. Sc.* **29** (2003), Nr. 11, 386-390
- 86 DIN 54 500: Bestimmung der dichtebezogenen Lichtstreu- und Lichtabsorptionskoeffizienten von Faserstoffen und Papier, April 1996
- 87 ISO 2469: Paper, boards and pulps – Measurement of diffuse reflectance factor, 1994
- 88 TAPPI T 525 om: Diffuse brightness of pulp ($d/0^\circ$), 1992

- 89 Borch, J.; Scallan, A.M.: A comparison between the optical properties of coated and loaded paper sheets. *Tappi J.* **58** (1975), Nr. 2, 134-135
- 90 Praast, H.; Göttching, L.: Auswirkungen von Altpapiereinträgen in grafischen Papieren auf optische, mechanische und drucktechnische Eigenschaften. AiF-Schlussbericht Nr. 10209, Darmstadt, 1997
- 91 Middleton, S.R.; Desmeules, J.; Scallan, A.M.: The Kubelka-Munk coefficients of fillers. *J. Pulp Pap. Sc.* **20** (1994), Nr. 8, J231-J235
- 92 unveröffentlichte Forschungsergebnisse des Fachgebiets Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik, TU Darmstadt
- 93 Bauer, R.W.: A simple method for calculation of light scattering coefficients for coated papers and paper coatings. *Tappi J.* **56** (1973), Nr. 11, 113-116
- 94 Lepoutre, P.; Means, G.: Supercalendering and coating properties. *Tappi J.* **61** (1978), Nr. 11, 85-87
- 95 Alince, B.; Lepoutre, P.: Light scattering of coatings formed from polystyrene pigment particles. *J. Colloid Interface Sci.* **76** (1980), Nr. 1, 182-187
- 96 Alince, B.; Porubská, J.; van de Ven, T.G.M.: Light scattering and microporosity in paper. *J. Pulp Pap. Sc.* **28** (2002), Nr. 3, 93-98
- 97 Grön, J.; Dahlvik, P.: Influence of pigment particle characteristics on coating colour properties. *Paperi ja Puu* **78** (1996), Nr. 9, 533-540
- 98 Järnström, L.; Lason, L.; Rigdahl, M.: Strichstruktur und optische Eigenschaften gestrichener Papiere. *Wochenbl. f. Papierfabr.* **124** (1996), Nr. 17, 736-741
- 99 Stanislawska, A.; Lepoutre, P.: Consolidation of pigmented coatings: development of porous structure. *Tappi J.* **79** (1996), Nr. 5, 117-125
- 100 Johnson, R.W.; Abrams, L.; Maynard, R.B.; Amick, T.: Use of mercury porosimetry to characterize pore structure and model end-use properties of coated papers – Part I: optical and strength properties. *Tappi J.* **82** (1999), Nr. 1, 239-251
- 101 Vidal, D.; Zou, X.; Uesaka, T.: Modeling coating structure development using a Monte Carlo deposition method – Part 2: Validation of the model and case study. *Tappi J.* **86** (2003), Nr. 5, 16-20
- 102 Chinga, G.; Helle, T.: Three-dimensional reconstruction of a coating layer structure. *J. Pulp Pap. Sc.* **29** (2003), Nr. 4, 119-122

- 103 Dodson, C. T. J.; Sampson, W. W.: The effect of paper formation and grammage on its pore size distribution. *J. Pulp Pap. Sc.* **22** (1996), Nr. 5, J165-J169
- 104 Larrondo, L.; St-Amour, S.; Monasterios, C.: The porous structure of paper coatings - a comparison of mercury porosimetry and stain-imbibition methods of measurement. *TAPPI Coating Conf.* 1995, 79-93
- 105 Kettle, J.; Matthews, P.; Ridgway, C.; Wagberg, L.: Investigation of the pore structure of paper by novel porosimetric techniques: application to super and soft-nip finishing. *Fundamentals of Papermaking Materials* 1997, 1355-1393
- 106 Ahlroos, J.; Grön, J.: A comparison of SGW and TMP as fiber raw material for film coating LWC. *TAPPI Coating Conf.* 1999, 481-500
- 107 Ahlroos, J.; Grön, J.: A comparison of SGW and TMP as fiber raw material for film coating LWC. *TAPPI Coating Conf.* 1999, 481-500
- 108 Corte, H.: The structure and physical properties of paper. *Handbook of Paper Science*, Vol. 2, 1982
- 109 Washburn, E.W.: Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material. *Proc. Nat. Acad. Sc.* **6** (1921), Nr. 7, 115-116
- 110 Rootare, H.M.; Prenzlöw, C.F.: Surface areas from mercury porosimeter measurements. *J. Phys. Chem.* **71** (1967), Nr. 6, 2733-2736
- 111 Garey, C.L.; Leekley, R.M.; Hultman, J.D.; Nagel, S.C.: Determination of pore size distribution of pigment coatings. *Tappi J.* **56** (1973), Nr. 11, 134-138
- 112 Lehtinen, E.: Introduction to pigment coating of paper. In: *Papermaking Science and Technology*, book 11, chapter 1
- 113 Hucke, M.; Götsching, L.: Auswirkungen von Altpapiereinträgen in gestrichenen Druckpapieren auf optische und drucktechnische Eigenschaften. *AiF-Schlussbericht* Nr. 12397, Darmstadt, 2002
- 114 Bown, R.: Particle size, shape and structure of paper fillers and their effect on paper properties. *Paper Technol.* **39** (1998), Nr. 2, 44-48
- 115 Paetow, R.; Ohrnberger, R.: Abdeckleistung von Streichfarben. *Wochenbl. f. Papierfabr.* 126 (1998), Nr. 8, 365-369
- 116 Starr, R.E.; Young, R.H.: An improvement in the determination of R and scattering coefficients for paper, pigments, and coatings. *Tappi J.* **58** (1975), Nr. 5, 74-78

- 117 Dalal, C.S.; Kline, J.E.: The relationship between degree of clay dispersion and the optical and pore properties of starch-clay coatings. TAPPI Coating Conf. Proc. 1974, 89-95
- 118 DIN 5033 Teil 2: Farbmessung; Normvalenz-Systeme, Mai 1992
- 119 Yang, L.; Kruse, B.: Scattering and absorption of light in turbid media. IARIGAI 26th Research Conf. Advances in digital printing 1999, München
- 120 Engström, G.; Morin, V.; Lin Bi, S.: Analysis of porosity distribution in coating layers. Tappi J. **80** (1997), Nr. 5, 203-209
- 121 PTS-Seminar "Grundlagen der Chemie für Papieringenieure", Papiertechnische Stiftung, München, 1991
- 122 Furó, I.: NMR cryoporometry: A novel method for the investigation of the pore structure of paper and paper coatings. Nordic Pulp Pap. Res. J. **14** (1999), Nr. 3, 221-225
- 123 Burri, P.; Naydowski, Ch.; Spielmann, D.; Swanson, E.T.: Using classical theory to design a pigment with improved optical properties. Tappi J. **80** (1997), Nr. 11, 193-199

Anhang A

Herleitung der Kubelka-Munk-Gleichungen

Ausgangspunkt der Theorie von Kubelka und Munk ist die Betrachtung der Lichtströme in einem planparallelen Raum, der sich seitlich sehr weit („unendlich“) erstreckt. Innerhalb dieses flächigen Raums wird eine dünne Schicht der Dicke dx betrachtet, die im Abstand x parallel zur Unterlage liegt. Diese dünne Schicht hat, wie jeder andere Bereich des Körpers, den Absorptionskoeffizienten k und den Streukoeffizienten s .

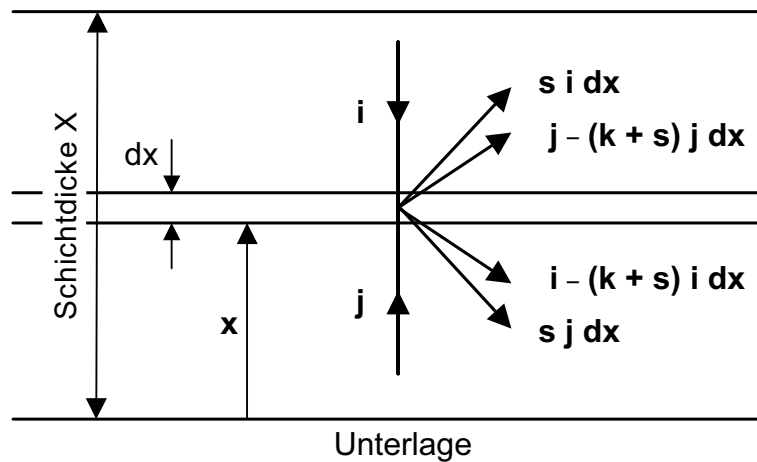


Abb. A-1: Vereinfachte Darstellung zur Absorption und Streuung in einer infinitesimal dicken Schicht zur Herleitung der Kubelka-Munk-Gleichungen

Fällt ein senkrecht von oben kommender Lichtstrahl der Intensität i durch die Schicht dx , wird er um einen Betrag geschwächt, der proportional zu i , $k + s$ sowie dx ist. Dieser geschwächte Lichtstrom fällt unter weiterer Schwächung auf die Unterlage und wird dort reflektiert. Auf diese Weise wird die Schicht dx vom Lichtstrom j durchflutet, der nach oben gerichtet ist und ebenfalls, analog zu i , proportional zu j , $k + s$ und dx geschwächt wird. Um die Gesamtbilanz der Lichtströme aufzustellen, müssen die aus der Streuung resultierenden Teilströme berücksichtigt werden. Der nach unten gerichtete Lichtstrom i wird demnach um den Betrag $(k + s) \times i \times dx$ verringert und um $s \times j \times dx$ erhöht. Analog wird j um $(k + s) \times j \times dx$ verringert und um $s \times i \times dx$ erhöht. Zu beachten ist die gegensätzliche Orientierung von di und dx , sodass sich die Änderungen folgendermaßen formulieren lassen:

$$-di = -(k+s)i \, dx + s \, j \, dx \quad (\text{A-1})$$

$$dj = -(k+s)j \, dx + s \, i \, dx \quad (\text{A-2})$$

Das Reflexionsvermögen der Schicht dx ist gegeben durch den Quotienten $r = \frac{j}{i}$. Dividiert

man (A-1) durch i und (A-2) durch j und ersetzt gleichzeitig $\frac{j}{i}$ durch r , ergibt sich:

$$-\frac{di}{i} = -(k+s) \, dx + s \, r \, dx \quad (\text{A-3})$$

$$\frac{dj}{j} = -(k+s) \, dx + s \, \frac{1}{r} \, dx \quad (\text{A-4})$$

Nach der Quotientenregel gilt für dr :

$$dr = d\left(\frac{j}{i}\right) = \frac{i \, dj - j \, di}{i^2} = \frac{dj \, r}{j} - \frac{r \, di}{i} \quad (\text{A-5})$$

und damit:

$$\frac{dr}{r} = \frac{dj}{j} - \frac{di}{i} \quad (\text{A-6})$$

Addiert man (A-3) und (A-4), folgt:

$$\frac{dj}{j} - \frac{di}{i} = \frac{dr}{r} = \left[-(k+s) \, dx + s \, \frac{1}{r} \, dx \right] + \left[-(k+s) \, dx + s \, r \, dx \right] \quad (\text{A-7})$$

$$\frac{dr}{r} = \left[-2(k+s) + \frac{s}{r} + s \, r \right] dx \quad (\text{A-8})$$

$$dr = \left[r^2 - 2 \frac{k+s}{s} r + 1 \right] s \, dx \quad (\text{A-9})$$

Mit der Abkürzung $\frac{k+s}{s} = a$

ergibt sich folgende Differenzialgleichung:

$$\frac{dr}{r^2 - 2 a r + 1} = s \, dx \quad (\text{A-10})$$

Diese Differenzialgleichung muss nun über die gesamte Dicke der planparallelen Schicht, also von $x = 0$ bis $x = X$, integriert werden. Hat die Unterlage den Reflexionsgrad $R(u)$, so gehört zur Dicke $x = 0$ der Reflexionsgrad $R(u)$ und zur Dicke X der Reflexionsgrad R_u . Man erhält also:

$$\int_{R(u)}^{R_u} \frac{dr}{r^2 - 2 a r + 1} = s \int_0^X dx \quad (\text{A-11})$$

Es sei $X = mx^2 + nx + p$ und $\Delta = 4mp - n^2$. Dann ergibt sich für das Integral für den Fall $\Delta < 0$ [57]:

$$\int \frac{dx}{X} = \frac{1}{\sqrt{-\Delta}} \ln \frac{2 m x + n - \sqrt{-\Delta}}{2 m x + n + \sqrt{-\Delta}} \quad (\text{A-12})$$

oder auch:

$$\int \frac{dx}{X} = -\frac{2}{\sqrt{-\Delta}} \arctanh \frac{2 m x + n}{\sqrt{-\Delta}} \quad (\text{A-13})$$

Zunächst gilt es zu zeigen, dass im vorliegenden Fall die Annahme $\Delta < 0$ zutrifft. Ein Vergleich der Koeffizienten in (A-11) ergibt:

$$\Delta = 4 - (-2 a)^2 = 4 (1 - a^2) \quad (\text{A-14})$$

Da $a = \frac{k+s}{s} = 1 + \frac{k}{s}$ und wegen $k > 0$ und $s > 0$ folgt $a > 1$. Somit gilt $\Delta < 0$.

Es lassen sich demnach zwei Lösungsansätze der Kubelka-Munk-Differenzialgleichungen unterscheiden, ein exponentieller, der auf der logarithmischen Lösung des Integrals beruht, sowie ein hyperbolischer Ansatz. Beide Ansätze führen zum gleichen Resultat, wie im Folgenden gezeigt wird.

Exponentieller Lösungsansatz

Integration von (A-12) ergibt:

$$\frac{1}{\sqrt{4a^2 - 4}} \ln \frac{2r - 2a - \sqrt{4a^2 - 4}}{2r - 2a + \sqrt{4a^2 - 4}} \left| \begin{array}{l} r = R_u \\ r = R(u) \end{array} \right. = s x \left| \begin{array}{l} x = X \\ x = 0 \end{array} \right. \quad (\text{A-15})$$

$$\ln \frac{R_u - a - \sqrt{a^2 - 1}}{R_u - a + \sqrt{a^2 - 1}} - \ln \frac{R(u) - a - \sqrt{a^2 - 1}}{R(u) - a + \sqrt{a^2 - 1}} = 2\sqrt{a^2 - 1} s x \quad (\text{A-16})$$

Wegen $\ln a - \ln b = \ln \frac{a}{b}$ folgt:

$$\ln \left(\frac{R_u - a - \sqrt{a^2 - 1}}{R_u - a + \sqrt{a^2 - 1}} \right) - \ln \left(\frac{R(u) - a - \sqrt{a^2 - 1}}{R(u) - a + \sqrt{a^2 - 1}} \right) = 2\sqrt{a^2 - 1} s x \quad (\text{A-17})$$

(A-17) stellt somit eine Lösung der beiden gekoppelten Differenzialgleichungen 1 und 2 dar.

Hyperbolischer Lösungsansatz

Integration von (A-13) ergibt:

$$-\frac{2}{\sqrt{4a^2 - 4}} \operatorname{ar tanh} \frac{2r - 2a}{\sqrt{4a^2 - 4}} \left| \begin{array}{l} r = R_u \\ r = R(u) \end{array} \right. = s x \left| \begin{array}{l} x = X \\ x = 0 \end{array} \right. \quad (\text{A-18})$$

$$-\frac{1}{\sqrt{a^2 - 1}} \operatorname{ar tanh} \frac{r - a}{\sqrt{a^2 - 1}} \left| \begin{array}{l} r = R_u \\ r = R(u) \end{array} \right. = s x \left| \begin{array}{l} x = X \\ x = 0 \end{array} \right. \quad (\text{A-19})$$

Wegen der Punktsymmetrie der Areatangensfunktion gilt $\operatorname{ar tanh} (-x) = -\operatorname{ar tanh} x$ und damit:

$$\frac{1}{\sqrt{a^2 - 1}} \operatorname{ar tanh} \frac{a - r}{\sqrt{a^2 - 1}} \left| \begin{array}{l} r = R_u \\ r = R(u) \end{array} \right. = s x \left| \begin{array}{l} x = X \\ x = 0 \end{array} \right. \quad (\text{A-20})$$

Einsetzen der Grenzen liefert:

$$\operatorname{ar\,tanh} \frac{a - R_u}{\sqrt{a^2 - 1}} - \operatorname{ar\,tanh} \frac{a - R(u)}{\sqrt{a^2 - 1}} = \sqrt{a^2 - 1} \, s \, X \quad (\text{A-21})$$

Mit $\operatorname{ar\,tanh} x - \operatorname{ar\,tanh} y = \operatorname{ar\,tanh} \frac{x - y}{1 - xy}$ folgt [57]:

$$\operatorname{ar\,tanh} \frac{\frac{a - R_u}{\sqrt{a^2 - 1}} - \frac{a - R(u)}{\sqrt{a^2 - 1}}}{1 - \frac{a - R_u}{\sqrt{a^2 - 1}} \frac{a - R(u)}{\sqrt{a^2 - 1}}} = \sqrt{a^2 - 1} \, s \, X \quad (\text{A-22})$$

$$\operatorname{ar\,tanh} \frac{\frac{\sqrt{a^2 - 1} [a - R_u - a + R(u)]}{\sqrt{a^2 - 1} \sqrt{a^2 - 1}}}{\frac{a^2 - 1 - [a^2 - aR_u - aR(u) + R_u R(u)]}{\sqrt{a^2 - 1} \sqrt{a^2 - 1}}} = \sqrt{a^2 - 1} \, s \, X \quad (\text{A-23})$$

$$\operatorname{ar\,tanh} \frac{\frac{\sqrt{a^2 - 1} [-R_u + R(u)]}{-1 + aR_u + aR(u) - R_u R(u)}}{\sqrt{a^2 - 1} \, s \, X} = \sqrt{a^2 - 1} \, s \, X \quad (\text{A-24})$$

$$\operatorname{ar\,tanh} \frac{\frac{\sqrt{a^2 - 1} [R(u) - R_u]}{a[R(u) - R_u] - R_u R(u) - 1}}{\sqrt{a^2 - 1} \, s \, X} = \sqrt{a^2 - 1} \, s \, X \quad (\text{A-25})$$

Mit $\operatorname{ar\,tanh} x = \frac{1}{2} \ln \frac{1+x}{1-x}$ folgt [57]:

$$\ln \frac{1 + \frac{\sqrt{a^2 - 1} [R(u) - R_u]}{a[R(u) - R_u] - R_u R(u) - 1}}{1 - \frac{\sqrt{a^2 - 1} [R(u) - R_u]}{a[R(u) - R_u] - R_u R(u) - 1}} = 2\sqrt{a^2 - 1} \, s \, X \quad (\text{A-26})$$

$$\ln \frac{\frac{a[R(u) - R_u] - R_u R(u) - 1 + \sqrt{a^2 - 1}[R(u) - R_u]}{a[R(u) - R_u] - R_u R(u) - 1}}{\frac{a[R(u) - R_u] - R_u R(u) - 1 - \sqrt{a^2 - 1}[R(u) - R_u]}{a[R(u) - R_u] - R_u R(u) - 1}} = 2\sqrt{a^2 - 1} s X \quad (\text{A-27})$$

$$\ln \frac{a[R(u) - R_u] - R_u R(u) - 1 + \sqrt{a^2 - 1}[R(u) - R_u]}{a[R(u) - R_u] - R_u R(u) - 1 - \sqrt{a^2 - 1}[R(u) - R_u]} = 2\sqrt{a^2 - 1} s X \quad (\text{A-28})$$

(A-28) lässt sich auch in folgender Form schreiben:

$$\ln \frac{-\left(R(u) - a + \sqrt{a^2 - 1}\right)\left(R_u - a - \sqrt{a^2 - 1}\right)}{-\left(R(u) - a - \sqrt{a^2 - 1}\right)\left(R_u - a + \sqrt{a^2 - 1}\right)} = 2\sqrt{a^2 - 1} s X \quad (\text{A-29})$$

Ein Vergleich mit (A-17) zeigt, dass beide Gleichungen übereinstimmen. Somit führen der exponentielle und der hyperbolische Lösungsansatz zum gleichen Ergebnis.

Lässt man die trübe Schicht sehr dick werden, wenn also $X \rightarrow \infty$ läuft, wird das Messergebnis von R_u nicht mehr von der Unterlage beeinflusst, und es wird $R_u = R(u) = R_\infty$. Für diesen Fall ($X \rightarrow \infty$) muss der Nenner der linken Seite von (A-17) bzw. (A-29) Null werden. Also gilt:

$$\left(R_\infty - a + \sqrt{a^2 - 1}\right)\left(R_\infty - a - \sqrt{a^2 - 1}\right) = 0 \quad (\text{A-30})$$

Da $a > 1$, führt nur der linke Term in (A-30) zu einer physikalisch sinnvollen Lösung, denn R_∞ kann nicht größer als 1 werden. Somit ergibt sich:

$$R_\infty = a - \sqrt{a^2 - 1} \quad (\text{A-31})$$

Auflösen nach a führt zu:

$$a^2 - 1 = (a - R_\infty)^2 \quad (\text{A-32})$$

$$a^2 - 1 = a^2 - 2aR_\infty + R_\infty^2 \quad (\text{A-33})$$

$$2a = R_{\infty} + \frac{1}{R_{\infty}} \quad (\text{A-34})$$

$$a = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{\infty}} + R_{\infty} \right) \quad (\text{A-35})$$

Weiter ergibt sich:

$$\sqrt{a^2 - 1} = a - R_{\infty} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{\infty}} + R_{\infty} \right) - R_{\infty} \quad (\text{A-36})$$

$$\sqrt{a^2 - 1} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{\infty}} - R_{\infty} \right) \quad (\text{A-37})$$

Und außerdem:

$$a + \sqrt{a^2 - 1} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{\infty}} + R_{\infty} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{\infty}} - R_{\infty} \right) \quad (\text{A-38})$$

$$a + \sqrt{a^2 - 1} = \frac{1}{R_{\infty}} \quad (\text{A-39})$$

Setzt man (A-31), (A-37) und (A-39) in (A-17) ein, folgt:

$$\ln \frac{\left(R_u - \frac{1}{R_{\infty}} \right) (R(u) - R_{\infty})}{(R_u - R_{\infty}) \left(R(u) - \frac{1}{R_{\infty}} \right)} = \left(\frac{1}{R_{\infty}} - R_{\infty} \right) s X \quad (\text{A-40})$$

Dies ist die Lösung der Kubelka-Munk-Ausgangsgleichungen (A-1) und (A-2).

Die bisherigen Berechnungen gingen von einer Integration über die Blattdicke aus. Da jedoch die Messung der Dicke eines Papiers wegen dessen Kompressibilität stets fehlerbehaftet ist, ersetzte van den Akker [59] die Dicke durch die flächenbezogene Masse, bei deren Bestimmung die Kompressibilität des Papiers keine Rolle spielt. Diese Substitution erfordert aber auch einen Ersatz der Koeffizienten s und k durch die Kenngrößen S und K , die die Dimension $\frac{\text{m}^2}{\text{kg}}$ aufweisen und dem entsprechend als dichtebezogener Lichtstreu-
koeffizient bzw. dichtebezogener Lichtabsorptionskoeffizient bezeichnet werden. Das di-

mensionslose Produkt aus S bzw. K und der flächenbezogenen Masse wird auch Streuvermögen bzw. Absorptionsvermögen genannt.

Ersetzt man in (A-17) alle Terme mit der Variablen a durch die entsprechende Funktion von R_∞ sowie sX durch $S m_A$, erhält man durch Auflösen nach R_u :

$$\ln \frac{\left(R_u - \frac{1}{R_\infty}\right)(R(u) - R_\infty)}{(R_u - R_\infty)\left(R(u) - \frac{1}{R_\infty}\right)} = 2 \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty\right) S m_A \quad (\text{A-41})$$

$$\frac{\left(R_u - \frac{1}{R_\infty}\right)(R(u) - R_\infty)}{(R_u - R_\infty)\left(R(u) - \frac{1}{R_\infty}\right)} = e^{\left(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty\right) S m_A} \quad (\text{A-42})$$

$$R_u (R(u) - R_\infty) - \frac{1}{R_\infty} (R(u) - R_\infty) = (R_u - R_\infty) \left(R(u) - \frac{1}{R_\infty}\right) e^{\left(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty\right) S m_A} \quad (\text{A-43})$$

$$\begin{aligned} R_u \left[(R(u) - R_\infty) - \left(R(u) - \frac{1}{R_\infty}\right) e^{\left(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty\right) S m_A} \right] = \\ = \frac{1}{R_\infty} (R(u) - R_\infty) - R_\infty \left(R(u) - \frac{1}{R_\infty}\right) e^{\left(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty\right) S m_A} \end{aligned} \quad (\text{A-44})$$

$$R_u = \frac{\frac{1}{R_\infty} (R(u) - R_\infty) - R_\infty \left(R(u) - \frac{1}{R_\infty}\right) e^{\left(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty\right) S m_A}}{(R(u) - R_\infty) - \left(R(u) - \frac{1}{R_\infty}\right) e^{\left(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty\right) S m_A}} \quad (\text{A-45})$$

Liegt die Probe auf einem ideal schwarzen Untergrund, wird $R(u) = 0$, und es folgt für den Reflexionsfaktor R_0 :

$$R_0 = \frac{e^{\left(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty\right) S m_A} - 1}{\frac{1}{R_\infty} e^{\left(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty\right) S m_A} - R_\infty} \quad (\text{A-46})$$

Der Zusammenhang zwischen R_∞ , k und s ergibt sich, wenn man in (A-35) a wieder durch $\frac{k+s}{s}$ ersetzt:

$$\frac{k+s}{s} = 1 + \frac{k}{s} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_\infty} + R_\infty \right) \quad (\text{A-47})$$

$$\frac{k}{s} = \frac{1}{2 R_\infty} + \frac{R_\infty}{2} - 1 \quad (\text{A-48})$$

$$\frac{k}{s} = \frac{1}{2 R_\infty} (1 + R_\infty^2 - 2 R_\infty) \quad (\text{A-49})$$

$$\frac{k}{s} = \frac{(1 - R_\infty)^2}{2 R_\infty} \quad (\text{A-50})$$

(A-50) wird auch als „Kubelka-Munk-Formel“ bezeichnet.

Will man R_∞ als Funktion von s und k ausdrücken, erhält man:

$$R_\infty = a - \sqrt{a^2 - 1} \quad (\text{A-51})$$

$$R_\infty = \frac{k+s}{s} - \sqrt{\left(\frac{k+s}{s}\right)^2 - 1} = 1 + \frac{k}{s} - \sqrt{\left(1 + \frac{k}{s}\right)^2 - 1} \quad (\text{A-52})$$

$$R_\infty = 1 + \frac{k}{s} - \sqrt{1 + \left(\frac{k}{s}\right)^2 + 2 \frac{k}{s} - 1} \quad (\text{A-53})$$

$$R_\infty = 1 + \frac{k}{s} - \sqrt{\left(\frac{k}{s}\right)^2 + 2 \frac{k}{s}} \quad (\text{A-54})$$

R_∞ hängt also nur vom Verhältnis $\frac{k}{s}$, nicht jedoch von den Absolutwerten dieser Größen ab.

Anhang B

Optische Zustandsebene

Multipliziert man den dichtebezogenen Lichtstreuungskoeffizienten S und den dichtebezogenen Lichtabsorptionskoeffizienten K mit der flächenbezogenen Masse m_A , erhält man die dimensionslosen Kenngrößen Streuvermögen ($S \cdot m_A$) und Absorptionsvermögen ($K \cdot m_A$). Das von diesen Parametern aufgespannte Koordinatensystem mit dem Streuvermögen als Ordinate und dem Absorptionsvermögen als Abszisse wird als optische Zustandsebene bezeichnet. Die optische Zustandsebene bietet die Möglichkeit, die Abhängigkeiten zwischen den Kubelka-Munk-Koeffizienten S und K , der Opazität sowie dem Eigenreflexionsfaktor R_∞ in einem einzigen Diagramm darzustellen.

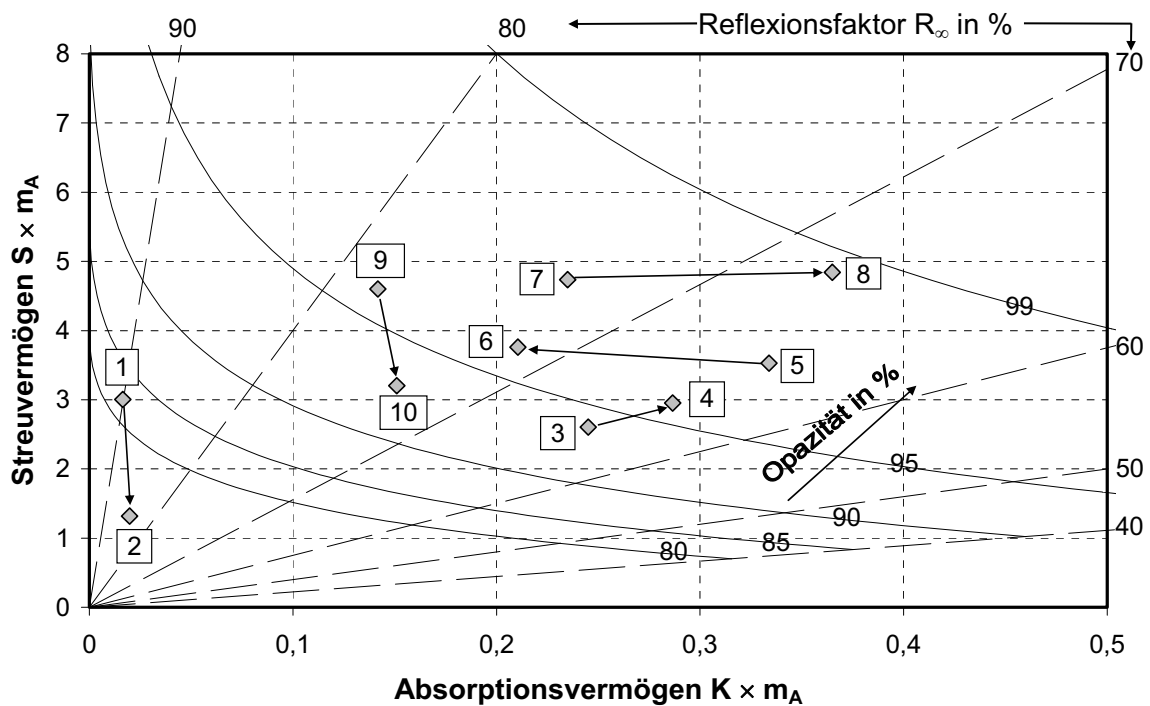


Abb. B-1: Ausschnitt aus der optischen Zustandsebene mit Beispielen der Auswirkung einiger technologischer Prozesse bei der Papierherstellung (Erklärung im Text)

Abb. B-1 zeigt einen Ausschnitt der optischen Zustandsebene mit eingezeichneten Linien gleichen Reflexionsfaktors R_∞ sowie gleicher Opazität. Entsprechend der Gleichung

$$R_\infty = 1 + \frac{K}{S} - \sqrt{\left(\frac{K}{S}\right)^2 + 2 \frac{K}{S}} \quad (\text{B-1})$$

hängt der Eigenreflexionsfaktor nur vom Verhältnis der Koeffizienten S und K ab. Die Isolinien von R_∞ sind demnach Geraden durch den Koordinatenursprung. Die Steigung der Geraden ergibt sich dabei als Quotient $\frac{S}{K}$.

Die Linien gleicher Opazität folgen einer komplexeren Funktion und zeigen einen hyperbelartigen Verlauf. Die Opazität O ist definiert als Quotient $\frac{R_0}{R_\infty}$. Der Zusammenhang mit dem Streuvermögen und dem Eigenreflexionsfaktor ergibt sich damit zu:

$$S \cdot m_A = \frac{R_\infty}{1 - R_\infty^2} \cdot \ln \frac{1 - O \cdot R_\infty^2}{1 - O} \quad (\text{B-2})$$

Umstellen und Auflösen nach O führt zu:

$$O = \frac{1 - e^{\frac{S \cdot m_A}{R_\infty} (1 - R_\infty^2)}}{R_\infty^2 - e^{\frac{S \cdot m_A}{R_\infty} (1 - R_\infty^2)}} \quad (\text{B-3})$$

Sollen für eine vorgegebene Opazität die Werte des Streu- und Absorptionsvermögens und damit der Verlauf der Isolinie ermittelt werden, ist zunächst gemäß (B-2) für das gewählte O das Streuvermögen in Abhängigkeit von R_∞ zu berechnen. Anschließend erfolgt die Bestimmung des Absorptionsvermögens nach folgender Gleichung:

$$K \cdot m_A = S \cdot m_A \frac{(1 - R_\infty)^2}{2 \cdot R_\infty} \quad (\text{B-4})$$

Bei Variation von R_∞ über einen ausreichend großen Bereich und in genügend feiner Auflösung erhält man eine hinreichend große Anzahl von Wertepaaren für das Streu- und Absorptionsvermögen, um den Verlauf gleicher Opazität in der optischen Zustandsebene darzustellen.

Die Auswirkungen verschiedener technologischer Prozesse auf die optischen Eigenschaften sind in der optischen Zustandsebene gut nachvollziehbar. In Abb.B-1 sind dazu einige Beispiele zu erkennen. Angenommen wurde in allen Fällen, soweit nicht ausdrücklich anders vermerkt, eine konstante flächenbezogene Masse.

- *Auswirkung der Mahlung*

Wie sich die optischen Eigenschaften eines Faserstoffs durch die Mahlung entwickeln, hängt stark vom Typ des Faserstoffs ab. Abb.B-1 zeigt zum einen die Entwicklung eines Zellstoffs (Pkt. 1 nach Pkt. 2) und zum anderen einen Holzstoff (Pkt. 3 nach Pkt. 4). Beim Zellstoff bleibt das Absorptionsvermögen nahezu unverändert, während das Streuvermögen aufgrund der abnehmenden Zahl streuender Grenzflächen sinkt. Die Folge ist eine Abnahme sowohl der Helligkeit als auch der Opazität. Im Gegensatz dazu nehmen beim Holzstoff sowohl das Streu- als auch das Absorptionsvermögen zu. Die Ursache liegt primär in der Generierung von Feinstoff, der wegen seiner großen spezifischen Oberfläche zusätzliche Grenzflächen schafft, aber auch aufgrund seines höheren Ligningehalts eine intensivere Färbung aufweist als das übrige Fasermaterial. Das Resultat ist eine höhere Opazität bei leicht reduzierter Helligkeit.

- *Auswirkung der Bleiche*

Durch eine Bleiche soll in erster Linie die Helligkeit des Faserstoffs erhöht werden. Dies wird erreicht, indem farbgebende Bestandteile (Chromophore) mithilfe der Bleichchemikalien zerstört oder entfernt werden, woraus eine Reduzierung des Absorptionsvermögens resultiert. In Abb.B-1 ist dieser Effekt am Beispiel eines Holzstoffs zu sehen (Pkt. 5 nach Pkt. 6). Die größere Helligkeit aufgrund des geringeren Absorptionsvermögens wird aber mit einer Abnahme der Opazität erkauft.

- *Auswirkung der Zugabe von Nuancierfarbstoff*

Der Einsatz von Nuancierfarbstoff erfolgt in der Regel zur Korrektur des Farborts. Der Farbstoff erhöht in bestimmten Wellenlängenbereichen den Absorptionskoeffizienten und damit das Absorptionsvermögen, während das Streuvermögen nahezu unverändert bleibt (Pkt. 7 nach Pkt. 8). Die Folge ist eine Abnahme der Helligkeit bei gleichzeitiger Erhöhung der Opazität.

- *Auswirkung der Satinage*

Bei der Satinage wird das Papier komprimiert und damit seine Dichte erhöht und seine Porosität reduziert. Die Folge ist eine geringere Zahl Licht streuender Grenzflächen, woraus ein niedrigeres Streuvermögen resultiert. Das Absorptionsvermögen wird hingegen kaum beeinflusst. Dadurch ergibt sich durch den Satinageprozess eine Abnahme sowohl der Helligkeit als auch der Opazität (Pkt. 9 nach Pkt. 10).

Anhang C

Tabellarische Darstellung der im Text verwendeten Diagramme

Tabelle C-1: Reflexionsfaktoren eines Spiegels und eines Weißstandards (Abb. 3-9)

Wellenlänge nm	Reflexionsfaktor	
	Spiegel	Ba-Sulfat
400	0,032	0,966
420	0,033	0,970
440	0,033	0,973
460	0,034	0,976
480	0,036	0,978
500	0,036	0,980
520	0,035	0,981
540	0,035	0,982
560	0,035	0,982
580	0,035	0,983
600	0,035	0,983
620	0,035	0,983
640	0,035	0,984
660	0,036	0,984
680	0,037	0,984
700	0,048	0,985

Tabelle C-2: Reflexionsfaktoren eines Zeitungsdruckpapiers über wechselndem Untergrund (Abb. 3-10)

Wellenlänge nm	Reflexionsfaktor			
	Stapel	Einzelblatt	Einzelblatt über Spiegel	Einzelblatt über Weißstandard
400	0,387	0,385	0,389	0,387
420	0,505	0,498	0,510	0,511
440	0,551	0,538	0,559	0,563
460	0,571	0,554	0,583	0,586
480	0,595	0,571	0,612	0,615
500	0,611	0,582	0,631	0,632
520	0,618	0,586	0,641	0,641
540	0,619	0,585	0,642	0,642
560	0,618	0,583	0,642	0,643
580	0,629	0,589	0,655	0,655
600	0,636	0,592	0,661	0,662
620	0,644	0,596	0,667	0,670
640	0,655	0,601	0,677	0,681
660	0,669	0,608	0,689	0,696
680	0,675	0,610	0,692	0,701
700	0,679	0,611	0,693	0,705

Tabelle C-3: Verteilung der flächenbezogenen Masse der Kopierfolien (Abb. 5-1)

Flächenbezogene Masse g/m ²	Anzahl
132-133	2
133-134	9
134-135	8
135-136	13
136-137	17
137-138	18
138-139	10
139-140	8
140-141	12
141-142	3

Tabelle C-4: Spektraler Verlauf der Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ für verschiedene Streichfarben (Abb. 5-4)

Wellenlänge nm	R_0			R_∞		
	Praxis K2	Labor C3	Labor K3	Praxis K2	Labor C3	Labor K3
400	0,336	0,414	0,393	0,843	0,849	0,718
420	0,339	0,412	0,394	0,849	0,861	0,750
440	0,334	0,402	0,388	0,861	0,868	0,777
460	0,331	0,395	0,383	0,870	0,871	0,801
480	0,325	0,384	0,375	0,876	0,870	0,817
500	0,323	0,376	0,370	0,877	0,870	0,828
520	0,317	0,366	0,363	0,875	0,869	0,839
540	0,312	0,355	0,355	0,869	0,868	0,850
560	0,307	0,344	0,347	0,866	0,866	0,858
580	0,304	0,337	0,343	0,860	0,864	0,863
600	0,301	0,329	0,338	0,859	0,862	0,866
620	0,298	0,321	0,333	0,880	0,860	0,867
640	0,295	0,312	0,327	0,887	0,858	0,869
660	0,289	0,301	0,319	0,889	0,855	0,870
680	0,284	0,292	0,313	0,889	0,854	0,869
700	0,280	0,283	0,307	0,889	0,852	0,871

Tabelle C-5: Farborte der untersuchten Streichfarben (Abb. 5-5)

Streichfarbe	a*	b*
Praxis K1	-3,84	4,43
Praxis K2	-3,48	1,74
Praxis C	-2,99	-1,77
Labor C1	-3,69	1,80
Labor C2	-3,68	1,93
Labor C3	-3,71	1,34
Labor K1	-4,26	7,18
Labor K2	-4,14	6,17
Labor K3	-4,32	7,53

Tabelle C-6: R_0 als Funktion der flächenbezogenen Masse des Strichauftrags der Praxisstreichfarbe K2 (Abb. 5-6)

Flächenbezogene Masse des Strichs g/m ²	R_0
2,5	0,309
5,0	0,446
7,5	0,528
10,0	0,588
15,0	0,693
20,0	0,737

Tabelle C-7: Porenoberfläche der Poren mit Durchmessern zwischen 100 und 600 nm als Funktion der flächenbezogenen Masse des Strichs (Abb. 5-10)

Flächenbezogene Masse des Strichs g/m ²	Porenoberfläche m ²			
	Praxis K2	Labor C2	Labor C3	Labor K3
2,5	0,022			
3,4		0,018	0,013	0,024
5,0	0,046			
7,5	0,052			
7,8		0,112	0,064	0,062
10,0	0,084			
10,6		0,163	0,074	0,087
15,0	0,100			
15,2		0,233	0,090	0,141
20,0	0,183			
23,9		0,374	0,096	0,240

Tabelle C-8: Dichtebezogener Lichtstreuungskoeffizient als Funktion der flächenbezogenen Masse (Abb. 5-17)

Flächenbezogene Masse des Strichs g/m ²	Dichtebezogener Lichtstreuungskoeffizient m ² /kg		
	Praxis K2	Labor C3	Labor K3
2,5	196,9		
3,4		177,2	167,0
5,0	162,7		
7,5	148,3		
7,8		123,8	145,9
10,0	141,2		
10,6		109,6	140,6
15,0	141,9		
15,2		89,1	127,7
20,0	135,2		
23,9		75,9	119,3

Tabelle C-9: Streuvermögen als Funktion der flächenbezogenen Masse (Abb. 5-19)

Flächenbezogene Masse des Strichs g/m ²	Streuvermögen		
	Praxis K2	Labor C3	Labor K3
2,5	0,492		
3,4		0,603	0,568
5,0	0,814		
7,5	1,112		
7,8		0,966	1,138
10,0	1,412		
10,6		1,162	1,490
15,0	2,129		
15,2		1,354	1,941
20,0	2,703		
23,9		1,814	2,851

Tabelle C-10: Streuvermögen als Funktion der Porenoberfläche (Abb. 5-20)

Porenoberfläche m ²	Streuvermögen
0,020	0,460
0,055	0,903
0,078	1,171
0,131	1,748
0,013	0,457
0,029	0,788
0,054	1,167
0,079	1,378
0,108	1,804
0,222	2,480
0,022	0,492
0,046	0,814
0,052	1,112
0,084	1,412
0,100	2,129
0,183	2,703
0,020	0,593
0,050	1,039
0,081	1,374
0,114	1,734
0,185	2,609
0,013	0,603
0,064	0,966

Porenoberfläche m ²	Streuvermögen
0,074	1,162
0,090	1,354
0,096	1,814
0,018	0,716
0,112	1,315
0,163	1,700
0,233	2,136
0,374	3,057
0,031	0,601
0,073	1,175
0,092	1,528
0,148	1,937
0,215	2,779
0,025	0,598
0,061	1,181
0,091	1,534
0,140	1,892
0,215	2,762
0,024	0,568
0,062	1,138
0,087	1,490
0,141	1,941
0,240	2,851

Tabelle C-11: Spektraler Verlauf des Reflexionsfaktors R_0 des LWC-Rohpapiers sowie des Normspektralwerts \bar{y} (Abb. 6-2)

Wellenlänge nm	\bar{y}	R_0
400	0,000	0,430
420	0,004	0,538
440	0,023	0,596
460	0,060	0,623
480	0,139	0,639
500	0,323	0,642
520	0,710	0,639
540	0,954	0,632
560	0,995	0,626
580	0,870	0,627
600	0,631	0,624
620	0,381	0,633
640	0,175	0,645
660	0,061	0,652
680	0,017	0,654
700	0,004	0,653

Tabelle C-12: Reflexionsfaktoren der Schichtsysteme aus Rohpapier und gestrichenen Folien für die Praxisstreichfarbe K2 (Abb. 6-3)

Anzahl der Schichten	Reflexionsfaktor	
	gemessen	berechnet
2	0,751	0,741
3	0,740	0,742
4	0,798	0,793
5	0,756	0,758
6	0,805	0,801
7	0,757	0,761
8	0,807	0,803
9	0,758	0,762
10	0,807	0,803

Tabelle C-13: Abweichung der Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ des Modells mit vollständiger Durchtränkung bezogen auf gestrichenes Papier (Abb. 6-6 und 6-7)

Streichfarbe	Flächenbezogene Masse des Strichs g/m ²	ΔR_0 %	ΔR_∞ %
Praxis K1	6,3	-0,4	-0,9
	9,4	-1,3	-1,9
	13,4	-1,4	-2,4
Praxis K2	5,0	0,1	-0,9
	10,0	-2,4	-2,9
	15,0	-2,2	-3,3
Praxis C	5,0	-2,6	-2,0
	10,0	-3,5	-3,3
	15,0	-3,2	-3,6
Labor C1	5,9	0,2	-0,8
	9,6	1,0	-0,5
	15,1	0,8	-1,1
	19,9	0,1	-1,8
Labor C2	5,3	-0,1	-0,8
	9,0	0,2	-0,9
	13,3	-0,8	-2,0
	19,4	-0,1	-1,9
Labor C3	5,8	-1,9	-2,0
	9,1	-2,9	-2,6
	14,5	-3,1	-3,5
	20,0	-3,4	-4,1
Labor K1	5,1	0,6	-0,3
	7,3	-0,8	-1,3
	11,0	-1,6	-2,1
	16,0	-1,8	-2,6
Labor K2	4,6	-0,4	-0,6
	6,1	-2,1	-1,7
	11,1	-2,4	-2,4
	14,5	-3,0	-2,9
Labor K3	5,3	1,9	0,0
	7,3	-0,2	-1,2
	10,4	-2,1	-2,3
	15,5	-1,2	-2,3

Tabelle C-14: Abweichung der Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ des Zweischichtmodells mit isolierter Strichschicht bezogen auf gestrichenes Papier (Abb. 6-9 und 6-10)

Streichfarbe	Flächenbezogene Masse des Strichs g/m ²	ΔR_0 %	ΔR_∞ %
Praxis K1	6,3	1,9	1,2
	9,4	1,4	0,7
	13,4	1,6	0,5
Praxis K2	5,0	2,2	1,1
	10,0	0,6	0,0
	15,0	1,1	0,1
Praxis C	5,0	-0,7	-0,2
	10,0	-0,7	-0,5
	15,0	0,3	-0,2
Labor C1	5,9	2,5	1,4
	9,6	4,1	2,5
	15,1	4,6	2,7
	19,9	4,2	2,4
Labor C2	5,3	2,4	1,5
	9,0	3,6	2,4
	13,3	3,1	1,9
	19,4	4,3	2,6
Labor C3	5,8	-0,4	-0,4
	9,1	-0,9	-0,4
	14,5	-0,4	-0,5
	20,0	-0,2	-0,6
Labor K1	5,1	2,3	1,4
	7,3	1,3	0,8
	11,0	0,9	0,5
	16,0	1,1	0,4
Labor K2	4,6	1,2	1,0
	6,1	-0,1	0,3
	11,1	0,3	0,4
	14,5	0,0	0,2
Labor K3	5,3	3,9	2,1
	7,3	2,3	1,4
	10,4	0,8	0,8
	15,5	2,2	1,4

Tabelle C-15: Abweichung der Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ des Zweischichtmodells mit Mischschicht bezogen auf gestrichenes Papier (Abb. 6-11 und 6-12)

Streichfarbe	Flächenbezogene Masse des Strichs g/m ²	ΔR_0 %	ΔR_∞ %
Praxis K1	6,3	1,4	0,8
	9,4	0,6	-0,1
	13,4	0,4	-0,7
Praxis K2	5,0	1,8	0,8
	10,0	-0,3	-0,9
	15,0	-0,3	-1,3
Praxis C	5,0	-1,0	-0,4
	10,0	-1,5	-1,3
	15,0	-1,2	-1,6
Labor C1	5,9	2,1	1,0
	9,6	3,2	1,6
	15,1	3,0	1,1
	19,9	1,9	0,2
Labor C2	5,3	2,0	1,1
	9,0	2,6	1,5
	13,3	1,6	0,5
	19,4	1,9	0,3
Labor C3	5,8	-0,7	-0,6
	9,1	-1,4	-0,9
	14,5	-1,4	-1,4
	20,0	-1,7	-2,1
Labor K1	5,1	2,0	1,2
	7,3	0,8	0,4
	11,0	0,1	-0,3
	16,0	-0,2	-0,8
Labor K2	4,6	1,0	0,8
	6,1	-0,5	-0,1
	11,1	-0,6	-0,4
	14,5	-1,1	-0,9
Labor K3	5,3	3,6	1,8
	7,3	1,8	0,9
	10,4	-0,1	0,0
	15,5	0,9	0,1

Tabelle C-16: Abweichung der Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ des modifizierten Zweischichtmodells mit Mischschicht bezogen auf gestrichenes Papier (Abb. 6-16 und 6-17)

Streichfarbe	Flächenbezogene Masse des Strichs g/m ²	ΔR_0 %	ΔR_∞ %
Praxis K1	6,3	-1,3	-0,8
	9,4	-2,4	-1,9
	13,4	-2,7	-2,7
Praxis K2	5,0	-0,3	-0,4
	10,0	-3,0	-2,5
	15,0	-3,2	-3,1
Praxis C	5,0	-2,6	-1,4
	10,0	-3,8	-2,6
	15,0	-3,6	-3,1
Labor C1	5,9	0,5	0,1
	9,6	1,2	0,5
	15,1	0,7	-0,2
	19,9	-0,4	-1,1
Labor C2	5,3	0,1	0,1
	9,0	0,3	0,2
	13,3	-1,0	-1,0
	19,4	-0,7	-1,2
Labor C3	5,8	-1,3	-1,0
	9,1	-2,2	-1,4
	14,5	-2,4	-2,0
	20,0	-2,8	-2,7
Labor K1	5,1	0,2	0,1
	7,3	-1,2	-0,8
	11,0	-2,2	-1,7
	16,0	-2,7	-2,4
Labor K2	4,6	-0,5	-0,1
	6,1	-2,2	-1,1
	11,1	-2,8	-1,7
	14,5	-3,5	-2,4
Labor K3	5,3	1,6	0,7
	7,3	-0,5	-0,4
	10,4	-2,5	-1,4
	15,5	-1,8	-1,5

Tabelle C-17: Abweichung der Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ des Zweischichtsystems mit fixer Penetrationsschicht von 5 g/m² bezogen auf gestrichenes Papier (Abb. 6-18 und 6-19)

Streichfarbe	Flächenbezogene Masse des Strichs g/m ²	ΔR_0 %	ΔR_∞ %
Praxis K1	6,3	1,5	0,9
	9,4	0,9	0,3
	13,4	1,1	0,0
Praxis K2	5,0	1,8	0,8
	10,0	0,1	-0,5
	15,0	0,6	-0,4
Praxis C	5,0	-1,0	-0,4
	10,0	-1,1	-0,9
	15,0	-0,3	-0,7
Labor C1	5,9	2,1	1,1
	9,6	3,6	2,0
	15,1	4,0	2,1
	19,9	3,6	1,8
Labor C2	5,3	2,0	1,1
	9,0	3,0	1,9
	13,3	2,5	1,4
	19,4	3,6	1,9
Labor C3	5,8	-0,6	-0,6
	9,1	-1,2	-0,7
	14,5	-0,8	-0,8
	20,0	-0,6	-1,0
Labor K1	5,1	2,0	1,2
	7,3	1,0	0,5
	11,0	0,6	0,1
	16,0	0,7	0,0
Labor K2	4,6	1,0	0,8
	6,1	-0,4	0,0
	11,1	-0,1	0,0
	14,5	-0,4	-0,2
Labor K3	5,3	3,6	1,8
	7,3	1,9	1,0
	10,4	0,3	0,4
	15,5	1,8	1,0

Tabelle C-18: Abweichung der Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ des Zweischichtsystems mit fixer Penetrationsschicht von 10 g/m^2 und doppelter Gewichtung von S_{RP} bezogen auf gestrichenes Papier (Abb. 6-20 und 6-21)

Streichfarbe	Flächenbezogene Masse des Strichs g/m^2	ΔR_0 %	ΔR_∞ %
Praxis K1	6,3	-1,9	-1,2
	9,4	-2,5	-2,0
	13,4	-2,2	-2,2
Praxis K2	5,0	-1,0	-0,9
	10,0	-3,0	-2,5
	15,0	-2,4	-2,5
Praxis C	5,0	-3,2	-1,8
	10,0	-3,8	-2,6
	15,0	-2,9	-2,5
Labor C1	5,9	0,0	-0,2
	9,6	1,1	0,4
	15,1	1,5	0,4
	19,9	1,2	0,2
Labor C2	5,3	-0,6	-0,4
	9,0	0,1	0,1
	13,3	-0,4	-0,5
	19,4	1,0	0,1
Labor C3	5,8	-1,5	-1,2
	9,1	-2,3	-1,4
	14,5	-2,0	-1,7
	20,0	-1,9	-1,9
Labor K1	5,1	-0,3	-0,2
	7,3	-1,6	-1,1
	11,0	-2,1	-1,6
	16,0	-1,9	-1,8
Labor K2	4,6	-1,0	-0,4
	6,1	-2,7	-1,4
	11,1	-2,6	-1,6
	14,5	-2,9	-1,9
Labor K3	5,3	1,1	0,3
	7,3	-0,8	-0,7
	10,4	-2,5	-1,4
	15,5	-1,0	-0,9

Tabelle C-19: Abweichung der Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ des Dreischichtmodells bezogen auf gestrichenes Papier (Abb. 6-23 und 6-24)

Streichfarbe	Flächenbezogene Masse des Strichs g/m ²	ΔR_0 %	ΔR_∞ %
Praxis K1	6,3	1,7	1,1
	9,4	1,2	0,5
	13,4	1,3	0,3
Praxis K2	5,0	2,1	1,0
	10,0	0,4	-0,2
	15,0	0,8	-0,2
Praxis C	5,0	-0,7	-0,2
	10,0	-0,9	-0,6
	15,0	-0,1	-0,5
Labor C1	5,9	2,4	1,3
	9,6	3,9	2,3
	15,1	4,2	2,3
	19,9	3,7	1,9
Labor C2	5,3	2,3	1,4
	9,0	3,3	2,2
	13,3	2,8	1,6
	19,4	3,8	2,1
Labor C3	5,8	-0,5	-0,5
	9,1	-1,0	-0,5
	14,5	-0,6	-0,7
	20,0	-0,5	-0,9
Labor K1	5,1	2,2	1,3
	7,3	1,2	0,7
	11,0	0,8	0,3
	16,0	0,8	0,2
Labor K2	4,6	1,2	0,9
	6,1	-0,2	0,2
	11,1	0,1	0,2
	14,5	-0,2	0,0
Labor K3	5,3	3,8	2,0
	7,3	2,1	1,3
	10,4	0,6	0,7
	15,5	1,9	1,1

Tabelle C-20: Abweichung der Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ des modifizierten Dreischichtmodells bezogen auf gestrichenes Papier (Abb. 6-25 und 6-26)

Streichfarbe	Flächenbezogene Masse des Strichs g/m ²	ΔR_0 %	ΔR_∞ %
Praxis K1	6,3	0,5	0,4
	9,4	-0,2	-0,3
	13,4	0,0	-0,6
Praxis K2	5,0	1,0	0,4
	10,0	-0,9	-0,9
	15,0	-0,5	-1,0
Praxis C	5,0	-1,6	-0,7
	10,0	-1,9	-1,3
	15,0	-1,2	-1,2
Labor C1	5,9	1,6	0,9
	9,6	2,9	1,7
	15,1	3,1	1,7
	19,9	2,6	1,3
Labor C2	5,3	1,3	0,9
	9,0	2,2	1,5
	13,3	1,5	0,9
	19,4	2,6	1,4
Labor C3	5,8	-0,8	-0,7
	9,1	-1,4	-0,8
	14,5	-1,1	-1,0
	20,0	-1,1	-1,2
Labor K1	5,1	1,3	0,8
	7,3	0,2	0,1
	11,0	-0,4	-0,3
	16,0	-0,3	-0,5
Labor K2	4,6	0,4	0,5
	6,1	-1,1	-0,3
	11,1	-1,0	-0,4
	14,5	-1,3	-0,7
Labor K3	5,3	2,9	1,5
	7,3	1,1	0,6
	10,4	-0,6	0,0
	15,5	0,7	0,4

Tabelle C-21: Abweichung der Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ bei Wahl des passenden Modells bezogen auf gestrichenes Papier (Abb. 6-27 und 6-28)

Streichfarbe	Flächenbezogene Masse des Strichs g/m ²	ΔR_0 %	ΔR_∞ %
Praxis K1	6,3	0,5	0,4
	9,4	-0,2	-0,3
	13,4	0,0	-0,6
Praxis K2	5,0	1,0	0,4
	10,0	-0,9	-0,9
	15,0	-0,5	-1,0
Praxis C	5,0	-0,7	-0,2
	10,0	-0,7	-0,5
	15,0	0,3	-0,2
Labor C1	5,9	0,5	0,1
	9,6	1,2	0,5
	15,1	0,7	-0,2
	19,9	-0,4	-1,1
Labor C2	5,3	0,1	0,1
	9,0	0,3	0,2
	13,3	-1,0	-1,0
	19,4	-0,7	-1,2
Labor C3	5,8	-0,4	-0,4
	9,1	-0,9	-0,4
	14,5	-0,4	-0,5
	20,0	-0,2	-0,6
Labor K1	5,1	1,3	0,8
	7,3	0,2	0,1
	11,0	-0,4	-0,3
	16,0	-0,3	-0,5
Labor K2	4,6	0,4	0,5
	6,1	-1,1	-0,3
	11,1	-1,0	-0,4
	14,5	-1,3	-0,7
Labor K3	5,3	2,9	1,5
	7,3	1,1	0,6
	10,4	-0,6	0,0
	15,5	0,7	0,4

Tabelle C-22: Gemessenes und berechnetes Streu- und Absorptionsvermögen der gestrichenen Papiere bei ca. 10 g/m² Strichauftrag (Abb. 6-30)

Streichfarbe	Absorptionsvermögen		Streuvermögen	
	gemessen	berechnet	gemessen	berechnet
Praxis K1	0,095	0,097	3,744	3,741
Praxis K2	0,085	0,090	3,771	3,681
Praxis C	0,083	0,084	3,702	3,610
Labor C1	0,085	0,086	2,959	3,098
Labor C2	0,085	0,084	3,166	3,193
Labor C3	0,088	0,088	2,949	2,853
Labor K1	0,097	0,100	3,543	3,508
Labor K2	0,096	0,095	3,622	3,456
Labor K3	0,098	0,095	3,651	3,526

Tabelle C-23: Abweichung der Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ des Zweischichtmodells mit isolierten Strichschichten bezogen auf beidseitig gestrichenes Papier (Abb. 6-31 und 6-32)

Streichfarbe	Flächenbezogene Masse des Strichs g/m ² /Seite	ΔR_0 %	ΔR_∞ %
Praxis K1	6,3	1,9	1,0
	9,4	1,5	0,6
	13,4	1,6	0,5
Praxis K2	5,0	2,9	1,1
	10,0	1,1	0,0
	15,0	1,2	0,0
Praxis C	5,0	0,1	-0,2
	10,0	-0,2	-0,4
	15,0	0,6	-0,1
Labor C1	5,9	4,3	2,1
	9,6	5,5	2,7
	15,1	5,5	2,8
	19,9	5,0	2,8
Labor C2	5,3	3,7	2,0
	9,0	5,1	2,4
	13,3	4,0	2,2
	19,4	4,7	2,8
Labor C3	5,8	0,3	0,0
	9,1	0,4	-0,2
	14,5	0,7	-0,3
	20,0	1,5	-0,4
Labor K1	5,1	3,1	1,6
	7,3	2,3	1,2
	11,0	1,9	0,9
	16,0	2,0	0,8
Labor K2	4,6	1,4	1,0
	6,1	0,4	0,6
	11,1	1,7	1,0
	14,5	0,5	0,3
Labor K3	5,3	3,5	1,8
	7,3	2,4	1,4
	10,4	1,6	1,2
	15,5	2,4	1,6

Tabelle C-24: Abweichung der Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ des modifizierten Zweischichtmodells mit Mischschichten bezogen auf beidseitig gestrichenes Papier (Abb. 6-33 und 6-34)

Streichfarbe	Flächenbezogene Masse des Strichs g/m ² /Seite	ΔR_0 %	ΔR_∞ %
Praxis K1	6,3	-1,3	-0,9
	9,4	-2,1	-1,8
	13,4	-2,2	-2,4
Praxis K2	5,0	0,2	-0,4
	10,0	-2,3	-2,2
	15,0	-2,5	-2,7
Praxis C	5,0	-2,2	-1,4
	10,0	-3,2	-2,3
	15,0	-2,8	-2,5
Labor C1	5,9	2,0	0,8
	9,6	2,6	1,0
	15,1	2,1	0,6
	19,9	1,4	0,2
Labor C2	5,3	1,1	0,6
	9,0	1,9	0,5
	13,3	0,4	-0,1
	19,4	0,7	-0,1
Labor C3	5,8	-0,7	-0,6
	9,1	-1,0	-1,0
	14,5	-1,1	-1,6
	20,0	-0,7	-1,9
Labor K1	5,1	0,8	0,3
	7,3	-0,3	-0,4
	11,0	-1,1	-1,1
	16,0	-1,3	-1,7
Labor K2	4,6	-0,6	-0,1
	6,1	-1,9	-0,8
	11,1	-1,2	-1,0
	14,5	-2,6	-2,0
Labor K3	5,3	1,0	0,4
	7,3	-0,4	-0,3
	10,4	-1,5	-0,9
	15,5	-1,0	-1,0

Tabelle C-25: Abweichung der Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ des modifizierten Dreischichtmodells mit Misch- und Streichfarbenschichten bezogen auf beidseitig gestrichenes Papier (Abb. 6-35 und 6-36)

Streichfarbe	Flächenbezogene Masse des Strichs g/m ² /Seite	ΔR_0 %	ΔR_∞ %
Praxis K1	6,3	0,5	-0,1
	9,4	0,0	-0,5
	13,4	0,1	-0,6
Praxis K2	5,0	1,7	-0,1
	10,0	-0,3	-0,9
	15,0	-0,2	-1,0
Praxis C	5,0	-1,0	-1,4
	10,0	-1,5	-1,4
	15,0	-0,7	-1,1
Labor C1	5,9	3,8	1,7
	9,6	5,0	3,0
	15,1	5,1	3,5
	19,9	4,7	3,7
Labor C2	5,3	2,5	0,7
	9,0	3,7	1,3
	13,3	2,6	1,3
	19,4	3,3	1,8
Labor C3	5,8	-0,2	-1,3
	9,1	-0,2	-1,0
	14,5	0,0	-1,0
	20,0	0,7	-0,9
Labor K1	5,1	2,0	0,4
	7,3	1,1	0,2
	11,0	0,6	0,0
	16,0	0,7	-0,1
Labor K2	4,6	0,5	-0,3
	6,1	-0,7	-0,5
	11,1	0,5	0,1
	14,5	-0,8	-0,6
Labor K3	5,3	2,4	0,7
	7,3	1,1	0,4
	10,4	0,3	0,2
	15,5	1,1	0,6

Tabelle C-26: Abweichung der Reflexionsfaktoren R_0 und R_∞ bei Wahl des passenden Modells bezogen auf beidseitig gestrichenes Papier (Abb. 6-37 und 6-38)

Streichfarbe	Flächenbezogene Masse des Strichs g/m ² /Seite	ΔR_0 %	ΔR_∞ %
Praxis K1	6,3	0,5	-0,1
	9,4	0,0	-0,5
	13,4	0,1	-0,6
Praxis K2	5,0	1,7	-0,1
	10,0	-0,3	-0,9
	15,0	-0,2	-1,0
Praxis C	5,0	0,1	-0,2
	10,0	-0,2	-0,4
	15,0	0,6	-0,1
Labor C1	5,9	2,0	0,8
	9,6	2,6	1,0
	15,1	2,1	0,6
	19,9	1,4	0,2
Labor C2	5,3	1,1	0,6
	9,0	1,9	0,5
	13,3	0,4	-0,1
	19,4	0,7	-0,1
Labor C3	5,8	0,3	0,0
	9,1	0,4	-0,2
	14,5	0,7	-0,3
	20,0	1,5	-0,4
Labor K1	5,1	2,0	0,4
	7,3	1,1	0,2
	11,0	0,6	0,0
	16,0	0,7	-0,1
Labor K2	4,6	0,5	-0,3
	6,1	-0,7	-0,5
	11,1	0,5	0,1
	14,5	-0,8	-0,6
Labor K3	5,3	2,4	0,7
	7,3	1,1	0,4
	10,4	0,3	0,2
	15,5	1,1	0,6

Tabelle C-27: Gemessenes und berechnetes Streu- und Absorptionsvermögen der beidseitig gestrichenen Papiere bei ca. 10 g/m² Strichauftrag (Abb. 6-39)

Streichfarbe	Absorptionsvermögen		Streuvermögen	
	gemessen	berechnet	gemessen	berechnet
Praxis K1	0,120	0,129	4,982	5,136
Praxis K2	0,104	0,117	4,855	4,995
Praxis C	0,101	0,105	4,774	4,797
Labor C1	0,095	0,098	3,444	3,903
Labor C2	0,091	0,097	3,663	4,067
Labor C3	0,097	0,101	3,352	3,453
Labor K1	0,123	0,130	4,471	4,724
Labor K2	0,119	0,122	4,451	4,610
Labor K3	0,124	0,123	4,664	4,738

Tabelle C-28: Dichtebezogener Lichtstreuungskoeffizient als Funktion der massenbezogenen Porenoberfläche matter und glänzender Papiere (Abb. 7-1)

Matte Papiere

Spez. Poren- oberfläche m ² /g	Dichtebez. Licht- streuungskoeffizient m ² /kg
0,000	3,7
0,040	21,4
0,050	34,2
0,064	35,7
0,071	18,8
0,075	38,7
0,076	43,8
0,078	29,1
0,079	16,4
0,082	41,4
0,087	35,4
0,087	38,3
0,094	32,4
0,096	37,0
0,097	38,9
0,105	46,2
0,107	40,5
0,112	31,8
0,113	15,5
0,116	47,7
0,124	40,4
0,125	49,1
0,128	46,9
0,129	48,5
0,135	47,3
0,182	41,7
0,194	49,0
0,195	41,2
0,208	45,3
0,215	40,7
0,219	40,1
0,238	48,9
0,242	52,6
0,243	43,7
0,278	49,4
0,280	44,0
0,288	48,5
0,298	47,4
0,305	51,8
0,309	51,0
0,316	50,6
0,338	39,3

Matte Papiere (Fortsetzung)

Spez. Poren- oberfläche m ² /g	Dichtebez. Licht- streuungskoeffizient m ² /kg
0,341	53,3
0,342	49,8
0,352	56,0
0,354	46,8
0,360	59,4
0,396	51,9
0,427	49,0
0,489	59,4
0,501	47,4
0,524	57,3
0,532	60,8
0,550	53,5
0,620	60,0
0,629	63,5
0,654	58,3
0,661	52,9
0,661	63,2
0,664	58,6
0,671	55,1
0,672	66,7
0,687	53,8
0,706	59,1
0,708	55,8
0,709	57,2
0,718	64,8
0,725	55,9
0,729	71,7
0,737	60,6
0,739	50,8
0,742	70,8
0,757	69,1
0,762	61,6
0,766	56,8
0,773	69,6
0,801	68,4
0,830	70,7
0,831	69,7
0,837	70,9
0,847	55,2
0,855	59,3
0,859	57,4
0,859	69,4

Matte Papiere (Fortsetzung)

Spez. Poren- oberfläche m ² /g	Dichtebez. Licht- streukoeffizient m ² /kg
0,861	61,2
0,861	57,7
0,881	69,5
0,890	62,7
0,894	59,8
0,904	57,6
0,906	65,2
0,908	67,1
0,911	70,5
0,927	57,6
0,948	60,4
0,966	64,5
0,975	62,6
0,987	60,2
0,996	75,2
1,003	68,5
1,010	65,6
1,027	61,5
1,034	65,5
1,065	71,8
1,110	66,2
1,112	59,5
1,115	72,1
1,130	67,6
1,140	74,4
1,140	64,2
1,155	69,0
1,186	68,0
1,219	77,7
1,238	69,1
1,276	77,4
1,317	71,0
1,325	70,3
1,346	65,5
1,348	72,4
1,408	75,3
1,575	77,5
1,703	79,7
1,841	78,9
1,911	78,2
2,135	82,9
2,217	80,9

Glänzende Papiere

Spez. Poren- oberfläche m ² /g	Dichtebez. Licht- streukoeffizient m ² /kg
0,255	29,4
0,642	41,1
0,657	38,1
0,662	41,5
0,703	46,9
0,714	50,2
0,720	50,5
0,745	53,8
0,786	45,1
0,893	50,3
1,141	59,2
1,191	59,9
1,208	57,2
1,238	58,3
1,271	61,9
1,306	64,4
1,325	53,8
1,334	61,7
1,400	72,5
1,424	48,5
1,436	48,9
1,464	51,2
1,533	51,2
1,551	55,8
1,558	57,2
1,896	51,6
1,912	56,0

Tabellarischer Lebenslauf

Name: Martin Hücke
Geburtsdatum: 17. Mai 1966
Geburtsort: Heide/Holstein
Familienstand: verheiratet

Schulbildung:

1972 - 1976 Grundschule in Heide/Holstein
1976 - 1986 Werner-Heisenberg-Gymnasium in Heide/Holstein
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

Studium:

1986 – 1989 Studium der Physik an der Technischen Hochschule Darmstadt
1989 – 1997 Studium des Allgemeinen Maschinenbaus Fachrichtung Papieringenieurwesen an der Technischen Hochschule Darmstadt
Abschluss: Diplom

Berufstätigkeit:

04/1997 – 09/2002 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Papierfabrikation der Technischen Universität Darmstadt bei Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. L. Göttching
10/2002 – 11/2004 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik der Technischen Universität Darmstadt bei Prof. Dr.-Ing. S. Schabel
seit 01/2005 Development Engineer bei Norske Skog Research & Development

Darmstadt, im Februar 2005

Martin Hücke